



POLITÉCNICO DE COIMBRA
ESCOLA SUPERIOR AGRÁRIA

MESTRADO EM GESTÃO AMBIENTAL

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONALIZANTE

**AUDITORIAS ENERGÉTICAS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO
DE ÁGUAS RESIDUAIS**

Caso de estudo: ETAR de Espinho

Autor: EVANILTON PIRES

Orientadora: MARTA LOPES

Coimbra, 2018



POLITÉCNICO DE COIMBRA
ESCOLA SUPERIOR AGRÁRIA

MESTRADO EM GESTÃO AMBIENTAL

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONALIZANTE

**AUDITORIAS ENERGÉTICAS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO
DE ÁGUAS RESIDUAIS**

Caso de estudo: ETAR de Espinho

Relatório de Estágio apresentado à Escola Superior Agrária de Coimbra

Para cumprimento dos requisitos necessários à

Obtenção do grau de mestre em Gestão Ambiental

Autor: Evanilton Edgar Serrão Pires (nº 21627001)

Orientadora: Prof. Doutora Marta Lopes

Coimbra, 2018

Agradecimentos

À empresa Centro Tecnológico de Gestão Ambiental (CTGA) por me ter recebido e permitido que aprendesse como funciona o mundo empresarial na prática.

Ao meu coorientador, o Eng.^o João Dinis por ser um verdadeiro amigo, por me ter dado a oportunidade de fazer estágio na CTGA e por me acompanhar durante todo o tempo de trabalho, dando-me algumas lições de vida.

Aos meus professores do curso de Mestrado em Gestão Ambiental por se terem dado nesta tarefa de formar e preparar profissionais para a vida.

Gostava de reiterar a minha maior gratidão a minha orientadora, a Prof. Doutora Marta Lopes pela dedicação em garantir que eu seja equipado com qualidade e competência para o trabalho académico.

Aos meus pais pelo amor incondicional, pela fidelidade em apoiar-me e garantir que cresça com saúde e cumpra as diferentes fases da minha vida.

Aos meus irmãos pelo apoio ao longo de todo o tempo.

A Deus por sua infinita graça derramada sobre mim, permitindo-me chegar até aqui e suprimindo todas as minhas necessidades em glória (Filipenses: 4:19) e aos irmãos da Igreja Evangélica em Rocha Nova e os amigos do Grupo Bíblico Universitário pela força e o carinho que me deram ao me receberem em Portugal.

A TODOS, MUITO OBRIGADO!

Resumo

A eficiência energética tem sido um objetivo perseguido e estudado por muitos atores em muitos setores de atividade. No setor do tratamento de águas e águas residuais tem havido alguns avanços no sentido de serem estudadas e aplicadas as melhores práticas de atuação sobre o desempenho energético, através da utilização de procedimentos sistemáticos, dado estas infraestruturas serem um importante consumidor energético a nível nacional. Assim, no presente trabalho foi desenvolvida uma metodologia de auditoria energética, com base nos referenciais normativos e legais em vigor, e realizada uma auditoria à ETAR de Espinho, distrito de Aveiro, Portugal, para se determinar o seu desempenho energético e identificar oportunidades de melhoria. A auditoria foi dividida nas seguintes fases: (1) determinação de indicadores de desempenho, aplicados em diferentes fases do tratamento, seguida de (2) análise do desempenho energético para a determinação de medidas de otimização e respetiva avaliação da relação custo/eficácia. Os resultados revelam que a ETAR de Espinho apresenta oportunidades de melhoria no sistema de digestão anaeróbia (otimização das condições de mistura e escoamento e identificação de fatores limitantes), no sistema de cogeração (melhoramento da pureza do biogás e eficiência do sistema) e na estação elevatória inicial (melhoria da eficiência dos mecanismos). Revelou-se também necessária uma análise mais aprofundada do sistema de recirculação de lamas. Adicionalmente, identificaram-se oportunidades de melhoria do sistema de gestão de informação da ETAR. Com base no trabalho realizado, será possível intervir na ETAR de Espinho e melhorar alguns dos aspetos operacionais em termos de eficiência energética.

Palavras-chave: Eficiência energética, ETAR, Auditoria energética.

Abstract

Energy efficiency has been, for some time, a prosecuted and studied object by many actors in several activity sectors. Concerning water and wastewater treatment, there have been some advances regarding the study and application of best practices to address the energy performance through systematic procedures, due to such infrastructures being important energy consumers in national level. Therefore, in the present study, an energy audit approach was developed, based on existing norms and legislation, and an energy audit performed to the Espinho Wastewater Treatment Plan (WWTP), located at the Aveiro district, Portugal, in order to assess its energy performance and identify improvement opportunities. The approach was divided in two steps: (1) key performance indicators were determined in the different phases of the treatment; (2) a deeper analysis of the performance indicators was developed for the determination of optimization measures and of their cost/efficiency relation. The results revealed that Espinho WWTP presents improvement opportunities located at the anaerobic digestion process (e.g., mixture and flow optimization as well as identification of limiting factors), the cogeneration stage (e.g., improvement of biogas purity and overall system efficiency) and the initial pumping systems (e.g., improvement of the mechanisms efficiency). This study also revealed as important a deeper analysis of the sludge recirculation system. Additionally, there is a need to improve the WWTP data management system. Based on this work, it will be possible to intervene on Espinho WWTP and to improve some operational aspects regarding its energy efficiency performance.

Keywords: Energy efficiency, Wastewater Treatment Plant, Energy audit.

Índice

Índice de figuras.....	vi
Índice de quadros.....	vii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	viii
1. Introdução	1
1.1 Indicadores de consumo energético em ETAR	4
1.2 Gestão de energia e eficiência energética em ETAR	6
1.2.1 Enquadramento legal da gestão energética em ETAR	8
1.2.2 Normas de sistemas gestão de energia e de auditoria energética	11
1.3 Objetivos	14
2. Metodologia	15
2.1 Sistematização e planeamento de auditoria	15
2.1.1 Preparação administrativa e delimitação de unidades.....	16
2.2 Medição energética.....	18
2.3 Análise energética.....	20
2.3.1 Determinação da situação atual e matriz de consumos.....	20
2.3.2 Determinação dos valores de referência	21
2.3.3 Análise técnico-económica das medidas de otimização	21
2.4 Cumprimento do plano de trabalhos.....	21
3. Resultados e discussão	23
3.1 ETAR de Espinho.....	23
3.1.1 Pré-tratamento e decantação primária	24
3.1.2 Tratamento biológico e decantação secundária	25
3.1.3 Estação elevatória final	26
3.1.4 Espessamento de lamas	27
3.1.5 Digestão anaeróbia	27
3.1.6 Desidratação de lamas	28
3.1.7 Cogeração e central térmica	28
3.1.8 Processos acessórios	28

3.2	Medição energética.....	29
3.2.1	Fatores críticos dos indicadores de desempenho.....	42
3.3	Análise energética.....	43
3.3.1	Determinação da situação atual e matriz de consumos.....	43
3.3.2	Valores de referência da ETAR de Espinho	43
4.	Conclusões	46
	REFERÊNCIAS.....	49
	APÊNDICES	54
	Apêndice A – Matriz legislativa.....	55
	Apêndice B – Plano temporal de atividades	58
	Apêndice C – Delimitação de unidades.....	59
	Apêndice D – Lista de grupos e matriz de consumos (excerto)	60

Índice de figuras

<i>Figura 1 – Consumos por habitante equivalente de uma amostra de ETAR de dimensões entre 10000 e 50000 habitantes por países europeus e da América do Norte (ENERWATER, 2015).</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2 – Modelo PDCA para a melhoria contínua de um SGE (NP EN ISO 50001:2012).</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3 – Esquema de sistematização da auditoria energética.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4 – Indicadores para a medição energética (por unidade): 1. Consumo específico total; 2. Consumo específico dos arejadores; 3. Produção de biogás em habitantes equivalentes; 4. Produção de biogás por massa orgânica seca; 5. Taxa de conversão de biogás em eletricidade; 6. Taxa de autossuficiência energética; 7. Consumo específico das estações de bombagem; 8. Consumo específico de calor externo.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5 – Esquema de auditoria e extensão em que foi cumprida.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 6 – Localização da ETAR de Espinho em relação a cidade de Espinho.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 7 – Esquema simplificado do funcionamento da ETAR de Espinho.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8 – Esquema do tratamento preliminar e primário.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 9 – Obra de entrada e decantação primária: (A) elevatória inicial; (B) gradagem e tamisação; (C) desarenação e desengorduramento; (D) decantação primária.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 10 – Reator biológico e decantadores secundários na ETAR de Espinho.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 11 – Espessamento gravítico de lamas primárias (A) e espessamento mecânico de lamas biológicas (B).</i>	<i>27</i>
<i>Figura 12 – Digestores anaeróbios (A) e Gasómetros (B).</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13 – Peso do consumo dos processos em relação ao consumo total da ETAR de Espinho</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14 – Consumo específico por habitante equivalente da ETAR.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 15 – Consumo específico dos arejadores por habitante equivalente.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 16 – Quantidade de biogás produzido por habitante equivalente.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 17 – Comparação da produção de biogás em relação a massa orgânica seca</i>	<i>35</i>
<i>Figura 18 – Comparação da taxa de conversão de biogás em eletricidade.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 19 – Comparação das taxas de autossuficiência energética ao longo dos anos.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 20 – Consumos e caudais das elevatórias iniciais e finais da ETAR de Espinho.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 21 – Consumos específicos das estações elevatórias iniciais.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 22 – Consumos específicos das estações elevatórias de recirculação de lamas.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 23 – Consumos específicos das estações elevatórias finais.</i>	<i>41</i>

Índice de quadros

<i>Quadro 1 – Cronologia do desenvolvimento das principais técnicas de tratamento de águas residuais.....</i>	<i>1</i>
<i>Quadro 2 – Processos de tratamento de água residual por membranas para recuperação de nutrientes em desenvolvimento recente (Xie et al., 2016)</i>	<i>3</i>
<i>Quadro 3 – Indicadores específicos de desempenho energético (ENERWATER, 2015; DWA-A 216E, 2015; Gramlich et al., 2014; CONSULAQUA et al., 2015; Foladori et al., 2015)</i>	<i>5</i>
<i>Quadro 4 – Periodicidade obrigatória para a realização de auditorias energéticas segundo o Decreto-Lei 71/2008....</i>	<i>9</i>
<i>Quadro 5 – Resumo da aplicação dos Decretos-Lei 68-A/2015 e 71/2008 as ETAR.....</i>	<i>10</i>
<i>Quadro 6 – Comparação entre as normas ISO 50002:2017 e DWA-A 216E (2015)</i>	<i>13</i>
<i>Quadro 7 – Lista de indicadores e respetivas fórmulas de cálculo.....</i>	<i>18</i>

Índice de tabelas

<i>Tabela 1 - Percentagens globais dos consumos energéticos das principais fases de uma ETAR (Fonte: NEWRI et al., s.d., cito por Silva, 2016)</i>	<i>7</i>
<i>Tabela 2 – Resultados dos indicadores de desempenho para os períodos em estudo. (s.d. significa “sem dados”).....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 3 - Valores do consumo energético, carga orgânica e habitantes equivalentes da ETAR de Espinho para 2015, 2016 e 2017. (s.d. significa “sem dados”).</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 4 – Resultados da produção energética e caudais diários de biogás dos anos 2015, 2016 e 2017.</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 5 – Resultados das estações elevatórias iniciais, finais e recirculação para 2015, 2016 e 2017. (s.d. significa “sem dados”).</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 6 – Valores de referência de algumas unidades da ETAR de Espinho (Excerto da lista de grupos).44</i>	
<i>Tabela 7 – Matriz de comparação dos valores de referência e dos valores históricos (de 2017) do sistema elevatório inicial da ETAR de Espinho.</i>	<i>45</i>

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

CBO – Carência Bioquímica de Oxigénio

CQO – Carência Química de Oxigénio

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

DGEG – Direção Geral da Energia e Geologia

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional para Estandardização)

MBR – *Membrane BioReactor* (inglês) ou Bio Reator de Membranas

PME – Pequenas e Médias Empresas

PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

PREn – Plano de Racionalização de Consumos de Energia

SCADA - *Supervisory Control And Data Acquisition* (controlo de supervisão e aquisição de dados)

SGCIE – Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia

SGE – Sistema de Gestão de Energia

SIG – Sistema de Informação Geográfica

WWTP – *Wastewater Treatment Plant* (Estação de Tratamento de Água Residual)

ZLD – *Zero Liquid Discharge* (Descarga líquida Zero)

1. Introdução

Com a finalidade de reduzir a carga poluente existente nas águas residuais urbanas ou industriais, as Estações de Tratamento de Água Residuais (ETAR) são constituídas por um conjunto de operações unitárias (quando prevalecem forças físicas) e processos unitários (quando prevalecem fenómenos químicos e/ou biológicos) que atuam sobre os diferentes constituintes encontrados nas águas residuais (Monte et al., 2016). Há muitos anos que se percebeu que a drenagem e o tratamento das águas residuais são fatores críticos para a saúde pública e a qualidade ambiental, resultando na grande disseminação e implementação das ETAR como forma de se contornar o problema (Gómez et al., 2017). Dispostos em diferentes fases em contínuo, as operações e processos de tratamento são realizadas ou auxiliadas por uma grande quantidade e variedade de equipamentos que necessitam de energia para o seu funcionamento, tendo por isso um custo energético de operação, pelo que se torna assim cada vez mais premente o conhecimento e avaliação do desempenho das ETAR, não só pelos custos associados, mas também pelos impactes ambientais associados a operação (CONSULAQUA et al., 2015; Foladori et al., 2015; Mustapha et al., 2017).

Os sistemas de drenagem de águas residuais já eram utilizados nalgumas civilizações do mundo antigo (desde cerca de 3000 A.C.), com o fim de se permitir a escorrência das vias, tendo atingido um nível de desenvolvimento avançado e complexo na época do Império Romano (Ferreira, 2013). Porém, desde 1843, em que se começou a construir o primeiro sistema de drenagem de águas residuais de Hamburgo, na Alemanha, começaram a desenvolver-se várias técnicas de tratamento das águas residuais: leitos percoladores em 1901, o tanque Imhoff em 1909, a desinfecção com cloro líquido em 1914 e as lamas ativadas, dando igualmente início ao desenvolvimento de variantes do processo em 1916 (Qasim, 1998). Posteriormente, foram desenvolvidas e aplicadas as técnicas de biodiscos (*rotating biological contactor*) em 1930 (Antonie, 2017), de remoção biológica de nutrientes, com início em 1954 (Grissop, 2010), as valas de oxidação em 1960 (Toprak, 2018) e Biorreatores de Membranas (MBR) no final da década de 1960 (Judd, 2006) (Quadro 1).

Quadro 1 – Cronologia do desenvolvimento das principais técnicas de tratamento de águas residuais.

Ano da 1ª construção	Tecnologia de tratamento	Referência
1901	Leitos percoladores	Qasim, 1998
1909	Tanque Imhoff	Qasim, 1998
1914	Desinfecção com cloro líquido	Qasim, 1998
1916	Lamas ativadas	Qasim, 1998
1930	Biodiscos	Antonie, 2017
1954	Remoção biológica de nutrientes	Grissop, 2010
1960	Valas de oxidação	Toprak, 2018
Depois de 1965	Biorreatores de membranas	Judd, 2006

A principal forma de energia necessária à operação das ETAR é a energia elétrica, energia esta que representa entre 25 a 50% dos custos de operação da instalação em sistemas convencionais de lamas ativadas. Todavia estes valores variam em função das tecnologias de tratamento utilizadas (Vera et al., 2013; Foladori et al. 2015; WERF, 2010; ENERWATER, 2015). Frequentemente, para além da energia elétrica, é também necessária a utilização de combustíveis para a produção de calor, de modo a manter a temperatura ideal de digestores anaeróbios (DWA-A 216E, 2015), o que resulta em custos operacionais adicionais.

Embora se tenham desenvolvido processos e métodos de tratamento eficazes para o cumprimento das normas de descarga legalmente estipuladas, tornou-se necessária a avaliação da sua eficiência do ponto de vista energético, por forma a assegurar a sua sustentabilidade, sendo notória a estreita relação entre eficiência de tratamento (maior grau de depuração com maiores consumos energéticos) e custos associados, e a intervenção da política e legislação na harmonização dos fatores económico e ambiental (Lu et al., 2016; Gómez et al., 2017; Gerek et al., 2017). Como resultado, tem havido muitos estudos sobre o desempenho energético das ETAR e as suas implicações do ponto de vista económico (relativos a custos económicos) e ambiental (pegada de carbono resultante), com vista ao estabelecimento de um método de referenciação de consumo para posterior comparação e partilha de boas práticas (Gomez et al., 2017, Gerek et al., 2017; Tong & Elimelech, 2016; Zou & He, 2017). É esperado que estes esforços resultem numa forma de melhorar os desempenhos energéticos das ETAR

sem pôr em causa a sua capacidade de tratar o efluente, cumprindo as exigências legais e normas de descargas correspondentes.

Tendo ganho popularidade no início do século XX, a digestão anaeróbia apresenta grandes benefícios a nível das propriedades do processo (ocorrendo em meio aquoso), e permite a valorização do biogás produzido para a produção de energia elétrica e de calor (em instalações de cogeração) e a obtenção de uma lama digerida bastante mineralizada com boa aplicação na agricultura (Appels et al., 2011). Todavia, por causa do baixo preço e a acessibilidade aos combustíveis fósseis, a digestão anaeróbia foi perdendo notabilidade, tendo apenas recuperado com a crise energética da década de 1970 e depois de, mais recentemente, se terem ultrapassado os problemas da falta de conhecimento, de dimensionamento e a falta de capacidade de gestão, chegando a apresentar um aumento da taxa de produção de energia proveniente de biogás de 13.2%/ano em 2014 (Vasco-Correa et al., 2018).

Adicionalmente, têm também sido desenvolvidos esforços para desenvolver novas tecnologias e métodos de tratamento. Existe hoje uma tendência emergente de se adotar a estratégia de Descarga Líquida Zero (ZLD do inglês *Zero Liquid Discharge*). Esta tecnologia consiste em se eliminar a rejeição de qualquer efluente à saída da ETAR, sendo o efluente tratado por processos térmicos de evaporação seguidos de condensação ou por sistemas de membranas (como osmose inversa, eletrodialise a base de membranas, osmose e destilação a base de membranas), sendo a maior parte da água reutilizada (em processos industriais, por exemplo) depois de tratada. Porém, estes sistemas têm grandes consumos energéticos que, consequentemente, resultam em emissões significativas de gases com efeito de estufa. Ainda assim, regulamentos de descarga de águas residuais tratadas mais restritivos, o aumento das taxas de descarga de águas residuais e a valorização da água potável estão a tornar a ZLD uma opção interessante, mesmo esta sendo caracterizada por altos custos de implementação e uso intensivo de energia (Tong & Elimelech, 2016). Ainda motivado pela perceção da escassez dos recursos, as novas técnicas de membranas (e até combinações entre elas) têm também sido desenvolvidas com o principal intuito de recuperar materiais presentes nas águas residuais que têm enorme utilidade nas atividades agrícolas e industriais, como azoto, fósforo, potássio, ureia, água e matéria orgânica (Xie et al., 2016).

Quadro 2 – Processos de tratamento de água residual por membranas para recuperação de nutrientes em desenvolvimento recente (Xie et al., 2016).

Mecanismo	Processo a base de membrana	Matéria/Nutrientes recuperados
PRESSÃO	Osmose inversa	Azoto, fósforo, potássio e água
	Nanofiltração	Azoto, fósforo, potássio e ureia
PRESSÃO OSMÓTICA	Osmose	Azoto, fósforo, potássio e água
TÉRMICO	Destilação por membrana com varredura gasosa	Água, azoto e outros materiais orgânicos
	Destilação por membrana a vácuo	
	Destilação por membrana com contacto direto	
ELÉTRICO	Eletrodialise com troca de iões em membrana	Azoto e fósforo

Outra tecnologia de tratamento atualmente em crescente adoção é a de sistemas bioeletroquímicos, que emprega microrganismos eletricamente ativos que doam ou recebem eletrões de um elétrodo e permitem a redução de $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-$, de modo a oxidar anaerobiamente a matéria orgânica presente nas águas residuais. Todavia, esta tecnologia enfrenta o desafio de se obter um balanço energético positivo na relação entre consumo e recuperação energética, isto é, obter mais energia elétrica direta ou hidrogénio gasoso do que a que se consome para manter o sistema de tratamento operacional (Zou & He, 2017).

Resumindo, existindo já uma grande experiência de desenvolvimento e prática das diferentes técnicas de tratamento, a tendência tem sido de transformar os sistemas de tratamento de consumo energético intensivo em sistemas de recuperação de recursos, com particular destaque na recuperação energética e de nutrientes.

1.1 Indicadores de consumo energético em ETAR

Uma vez que as ETAR podem apresentar diferentes características de dimensionamento e tecnologias de funcionamento (caudal, cargas poluentes, etapas de tratamento, etc.), torna-se difícil comparar os desempenhos energéticos de forma adequada entre diferentes ETAR, pelo que se tornou necessário desenvolver indicadores ou relações específicas de consumo comuns aos vários tipos de ETAR. Os indicadores de desempenho energético podem ser categorizados na base hidráulica

(/m³ ou /m³.m), base de CQO removida (/kgCQO_{removida}) ou por “Habitantes Equivalentes”, dependendo apenas dos processos ou fases do tratamento a que se referem, sendo uns mais convenientes que outros consoante a situação (Quadro 3):

Quadro 3 – Indicadores específicos de desempenho energético (ENERWATER, 2015; DWA-A 216E, 2015; Gramlich et al., 2014; CONSULAQUA et al., 2015; Foladori et al., 2015).

Indicador	Base da medição	Expressão matemática	Exemplos de Processos ou equipamentos adequados
Consumo (C') em volume (V)	Volume de água tratada e altura manométrica	$C'(V) = \frac{\text{Consumo (kWh)}}{\text{Volume (m}^3\text{)}}; \text{ Ou}$ $C'(V) = \frac{\text{Consumo (kWh)}}{\text{Volume (m}^3\text{)} \times \text{altura(m)}}$	Estações elevatórias, tamisadores, raspadores, equipamentos de transporte.
Consumo (C') por carga orgânica	CQO removida	$C'(CQOrem) = \frac{\text{Consumo (kWh)}}{\text{Carga CQO (kgCQOrem)}}$	Agitadores, arejadores, raspadores e motores de acionamento.
Consumo (C') por habitante equivalente	Habitantes equivalentes na base CQO ou CBO	$C'(Hab. eq) = \frac{\text{Consumo (kWh)}}{\text{Habitantes eq. (hab. eq)}}$	Instalações e Edifícios de apoio

Com base nestes indicadores é possível estabelecer um consumo de referência (*baseline*) uniformizado cujo valor pode ser comparado com qualquer outra ETAR e servir de base para aferir as melhorias de eficiência energética. A título de exemplo, o projeto ENERWATER (2015) apresenta resultados comparativos para ETAR de dimensões entre 10 000 e 50 000 habitantes de diferentes países onde se observou que entre países europeus, a Alemanha apresenta os consumos específicos mais baixos com 38,8 kWh/hab.eq, seguido da Espanha com 53,7 kWh/hab.eq, enquanto Guerrini et al. (2017) cita uma comparação de consumos médios entre a Alemanha (0,67 kWh/m³), Reino Unido (0,64 kWh/m³) e Estados Unidos (0,45 kWh/m³), sendo dos Estados Unidos as mais eficientes.

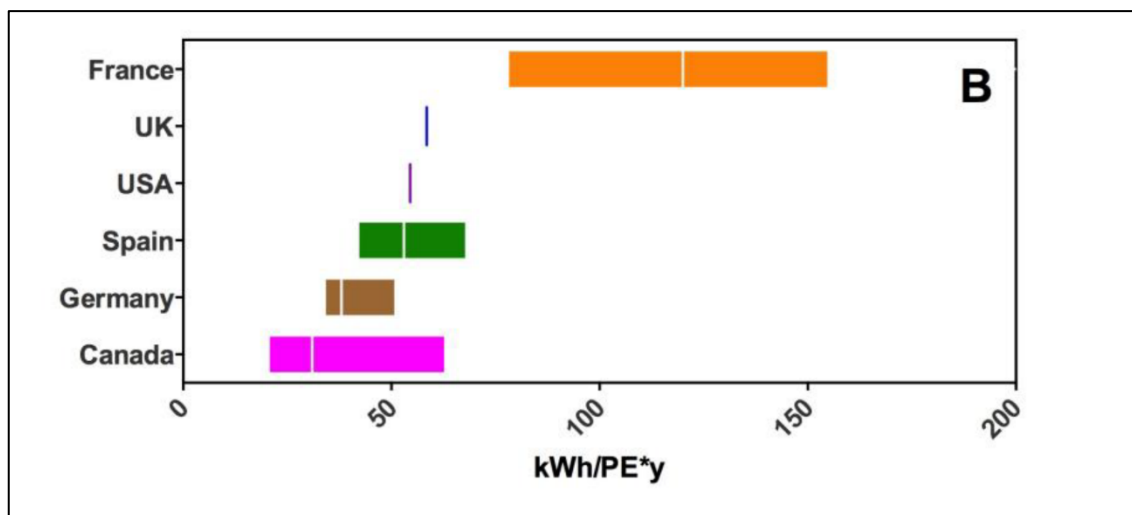


Figura 1 – Consumos por habitante equivalente de uma amostra de ETAR de dimensões entre 10000 e 50000 habitantes por países europeus e da América do Norte (ENERWATER, 2015).

É importante notar que, para uma mesma amostra de ETAR, os diferentes indicadores podem mostrar resultados diferentes, isto é, ao comparar duas ETAR, um indicador pode demonstrar que a ETAR 1 é mais eficiente que a outra, mas outro indicador demonstrar que a ETAR 2 é mais eficiente. Isto acontece pela razão de os indicadores se relacionarem a grandezas diferentes, bem como serem influenciados por diferentes fatores, como é o caso do indicador “kWh/m³” que pode ser influenciado por fatores como o clima, tipo de planeamento urbano e conceção do sistema de drenagem (ENERWATER, 2015).

1.2 Gestão de energia e eficiência energética em ETAR

Os consumos de energia numa ETAR são muito dependentes das tecnologias de tratamento e dos tipos de equipamentos que a compõem. Estudos comparativos de consumos de ETAR têm mostrado que as tecnologias de tratamento mais exigentes em termos energéticos são os biorreatores de membrana (0,986 kWh/m³), seguidos pelas valas de oxidação (0,773 kWh/m³), sistemas de remoção de nutrientes (0,506 kWh/m³) e pelas lamas ativadas (0,453 kWh/m³) (Lazarova et al., 2012 cito por Silva, 2016). Já entre as diferentes fases das ETAR, a fase de maior consumo corresponde ao tratamento biológico (Hernandez-Sancho et al., 2011). Os sistemas de lamas ativadas consomem entre 50% a 65% do consumo total de uma ETAR, enquanto o tratamento preliminar e primário representa cerca de 11% do valor global da mesma (Tchobanoglous et al., 2006). O peso do consumo energético das diferentes fases de uma ETAR podem ser vistos na Tabela1.

Tabela 1 - Percentagens globais dos consumos energéticos das principais fases de uma ETAR (Fonte: NEWRI et al., s.d., cito por Silva, 2016)

Etapa de tratamento/Processo		Consumo energético (%)
Pré-tratamento	Gradagem	0,01 – 0,1
	Tamisação	1
	Bombagem	15 – 50
Tratamento primário		≤1
Tratamento secundário		50
Tratamento de lamas	Espessamento	Por gravidade: 0,1 – 0,2 Por flotação: 2 – 10
	Digestão anaeróbia	15 – 50
	Desidratação	3 – 10
Desinfecção		≤1

É referido que, entre os vários tipos de sistemas de tratamento, os maiores consumidores energéticos são os sistemas elevatórios e os arejadores (WERF, 2010; Guerrini et al., 2017). Porém, existem outros equipamentos que podem representar consumos significativos, como é o caso das bombas de recirculação, dos difusores da estabilização aeróbia (Foladori et al., 2015) e os misturadores ou agitadores (Zou & He, 2017; Gómez et al., 2017). Porém, só uma análise detalhada dos desempenhos energéticos das diferentes unidades pode revelar o seu real peso no balanço energético do sistema de tratamento. Por tal motivo, é importante garantir uma monitorização cuidada com aquisição de informação viável (ENERWATER, 2015; Guerrini et al. 2017). Uma vez conhecidos os padrões de consumos de uma ETAR, será possível iniciar atividades de gestão de energia.

A eficiência energética consiste na redução do consumo de energia para a realização de um determinado trabalho, mantendo a obtenção do mesmo resultado (Tecnica Engenharia, 2018). Com este intuito, há alguns anos que os governos Europeus começaram a envidar esforços para a criação de estratégias a nível nacional e comunitário para se direcionar os consumidores (particulares, empresas e indústrias) a abraçarem atitudes e decisões que permitam reduzir o consumo energético das suas atividades sem comprometer o resultado dessas atividades (Fawkes, 2018). Atualmente, as metas da União Europeia para 2030 apontam para uma eficiência indicativa de pelo menos 27% (comparando a com as projeções atuais) a ser revista em 2020, pensando em subir para 30% depois da revisão (Comissão Europeia, 2018).

Os principais benefícios apontados à eficiência energética numa ETAR incidem sobre o ambiente e saúde pública (redução da poluição atmosférica e das emissões de gases com efeito estufa), a dimensão financeira (redução dos custos com a energia), económicos (suporte ao crescimento económico com criação de empregos e

desenvolvimento do mercado do setor da eficiência energética) e aspetos operacionais (melhoria da qualidade no fornecimento de energia, aumento do tempo de vida de infraestruturas e equipamentos) (U.S. EPA, 2013).

Todavia, na busca da eficiência energética e dos seus benefícios, é necessário identificar as oportunidades de melhoria de desempenho, isto é, determinar onde se pode ser mais eficiente. Para atingir tal objetivo, recorre-se assim à auditoria energética, pois esta ferramenta constitui uma análise do uso e consumo da energia com o fim de identificar, quantificar e reportar as oportunidades de melhoria (NP ISO 50002:2017) e, por consequência, reduzir significativamente os custos energéticos (Guerrini et al., 2017). As auditorias energéticas podem ser implementadas com base em normas, pois estas constituem um meio sistemático para a sua realização e prossecução.

A execução de auditorias energéticas não representa um custo significativo sobre os custos do tratamento das águas residuais, nem a implementação de medidas de eficiência energética envolve necessariamente investimentos significativos, podendo-se atingir bons resultados apenas com ajustes operacionais ou pequenos investimentos em controlo e automação (Olsson, 2012, cito por Faladori et al.; ENERWATER, 2015). Em muitos casos, as ETAR só funcionam em metade da sua capacidade e com equipamentos sobredimensionados, o que resulta num consumo exagerado de energia sem atingir níveis adequados de eficiência, refletindo-se em custos operacionais desnecessários (Faladori et al., 2015). Também, uma adequada conceção das estruturas, manutenção, controlo e implementação de sistemas de produção de energia (cogeração, por exemplo) constituem medidas de gestão que permitem melhorar os níveis de eficiência energética (de Haas, 2016).

Não obstante o enorme potencial que as medidas de eficiência energética podem acarretar, elas devem ser avaliadas e determinadas numa base particular, isto é, caso a caso, visto que existem muitos fatores que influenciam o grau de eficiência energética. São exemplo disso a qualidade do efluente a tratar (carga orgânica e peso de descarga de efluentes industriais), sazonalidade, solução tecnológica adotada, tamanho da ETAR e capacidade utilizada (Guerrini et al., 2017).

1.2.1 Enquadramento legal da gestão energética em ETAR

Desde 1982 que a legislação Portuguesa endereça as questões de eficiência energética, com o Decreto-Lei nº 58/82 e portarias subsequentes (Decreto-Lei n.º 58/82). O Regulamento de Gestão dos Consumos de Energia (RGCE) (Decreto-Lei n.º 58/82)

foi alterado ao longo do tempo para compatibilizá-lo com as novas exigências legais a nível europeu, revisões fiscais e promoção de acordos de utilização racional de energia, tendo chegado a constituir o atual Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia, regulado pelo Decreto-Lei n.º 71/2008 (Decreto-Lei n.º 71/2008).

O Decreto-Lei n.º 71/2008 regula o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) que tem como objetivo promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos de instalações consumidoras intensivas de energia. Este diploma especifica nas alíneas a) e b) do n.º 1 do artigo 6.º que as auditorias devem ser realizadas com uma periodicidade de 6 anos para as instalações com um consumo igual ou superior a 1000 tep/ano e uma periodicidade de oito anos para as instalações com consumos entre 500 e 1000 tep/ano (Quadro 4), e que as auditorias incidem sobre as condições de utilização de energia, bem como a conceção e o estado da instalação (n.º 2 do artigo 6.º). Torna também todas as instalações abrangidas pelo SGCIE obrigadas a elaborar Planos de Racionalização de Consumo de Energia (PREn) e a prever a implementação de medidas com tempos de retornos iguais ou inferiores a 3 anos (para consumos entre 500 e 1000 tep) ou 5 anos (para consumos superiores a 1000 tep).

Quadro 4 – Periodicidade obrigatória para a realização de auditorias energéticas segundo o Decreto-Lei 71/2008.

Diploma	Tipo de instalação (por dimensão de consumo em tep)	Periodicidade da realização de auditorias	Incidência da auditoria	Período de retorno das medidas a implementar pelo PREn
Decreto-Lei 71/2008	>500 tep e <1000 tep	8 Anos	- Uso de energia - Conceção das instalações - Estado das instalações	3 Anos
	>1000	6 Anos		5 Anos

Ainda no n.º 2 do artigo 19.º do Decreto-Lei n.º 71/2008, é explicitado que para a aplicação do diploma, o diretor-geral da Direção Geral da Energia e Geologia (DGEG) aprova, por despacho a publicar no *Diário da República*, os fatores de conversão para equivalente a petróleo de teores em energia de combustíveis selecionados para utilização final, elementos a ter em consideração na realização de auditorias energéticas, na elaboração dos planos de racionalização energética e nos relatórios de execução e progresso e o regulamento interno do SGCIE. Os fatores de conversão para toneladas equivalente a petróleo foram publicados no Despacho n.º 17313/2008 e os elementos a considerar nas auditorias energéticas, planos de racionalização e relatórios de execução e progresso no Despacho n.º 17449/2008.

Como diploma mais recente, a Diretiva 2012/27/EU de 25 de outubro de 2012 vem transposta no direito nacional Português pelo Decreto-lei n.º 68-A/2015, de 30 de Abril, que estabelece disposições em matéria de eficiência energética e cogeração, contendo medidas de promoção de eficiência energética, regras sobre auditorias energéticas e contratos de gestão de eficiência energética.

De acordo com o Decreto-Lei 68-A/2015, as ETAR enquadram-se nas “Ações específicas anteriormente implementadas com impacto em 2020”, no âmbito do Programa «Sistema de eficiência Energética na Indústria» e nas “Medidas políticas destinadas a obter novas economias de energia”, no Programa “Sistemas de Eficiência Energética na Indústria e outros setores”, sendo obrigadas a realizar auditorias energéticas nos termos do Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) constante no Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de Abril (Apêndice A – Matriz legislativa). O Anexo IV do Decreto 68-A/2015 especifica os critérios mínimos aplicáveis às auditorias energéticas, incluindo as realizadas no âmbito dos sistemas de gestão da energia, estabelecendo princípios regulamentares da sua realização, embora de forma um pouco vaga.

Vale salientar que é nos Decreto-Lei 319/2009, Decreto-Lei 68-A/2015 e Despacho n.º 17449/2008 onde se encontra a definição de “auditoria energética”. Deste modo, a legislação portuguesa define “*auditoria energética*” como “*um procedimento sistemático através do qual se obtém um conhecimento adequado sobre as características de consumo energético de um edifício ou de um conjunto de edifícios, de frotas, de uma atividade ou de uma instalação industrial ou comercial ou de serviços públicos ou privados, se identificam e quantificam as economias de energia com boa relação custo-eficácia*” (Decreto-Lei n.º 68-A/2015) e que “*consiste num levantamento detalhado de todos os aspetos relacionados com o uso da energia, ou que de alguma forma contribuam para a caracterização dos fluxos energéticos*” (Despacho n.º 17449/2008).

Em resumo, as ETAR podem estar abrangidas pelo SGCIE e desse modo, dependendo do seu consumo energético, elas ficam sujeitas a um determinado regime de auditoria energética, elaboração de Planos de Racionalização de Consumos de Energia e medidas de racionalização correspondentes, conforme ilustra o Quadro 5.

Quadro 5 – Resumo da aplicação dos Decretos-Lei 68-A/2015 e 71/2008 as ETAR.

Diploma	Aplicação a ETAR
Decreto-Lei 68-A/2015	As ETAR enquadram-se nos sistemas de eficiência energética na indústria e, por isso, incluem-se nos Sistemas de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (regulado pelo Decreto-Lei 71/2008) e no seu regime de auditoria.
Decreto-Lei 71/2008	Uma vez determinado o consumo da ETAR ¹ , esta fica sujeita ao regime de auditoria correspondente e obrigada a elaboração de Planos de Racionalização de Energia com implementação de medidas com período de retorno correspondente.

1.2.2 Normas de sistemas gestão de energia e de auditoria energética

Ao longo dos anos têm sido desenvolvidos procedimentos e sistemas de gestão relativos a várias áreas que permitem às organizações estabelecerem objetivos específicos e processos para atingir esses objetivos. Um bom exemplo disso são as normas da família “ISO” que possuem normas referentes a qualidade (ISO 9001), ambiente (ISO 14001), segurança da informação (ISO 27001), saúde e segurança ocupacional (OHSAS 18001), certificação de laboratórios (ISO 17025) e outros, incluindo a norma para a implementação de um sistema de gestão de energia (ISO 50001).

Desde 2003 que se desenvolveu na Suécia a primeira norma Europeia que permitia a empresas e organizações otimizar a eficiência energética das suas atividades, sendo esta a base para a norma Europeia DIN EN 16001:2009 (Adelphi, 2018). Da consolidação desta, e outras normas de outros países (algumas anteriores a 2003), resultou a norma ISO 50001:2011 de 1 de junho de 2011, pela *International Organization for Standardization*, que normaliza a implementação de Sistemas de Gestão de Energia (SGE).

Com o objetivo de auxiliar a organizações a estabelecer sistemas e processos para a melhoria do desempenho energético, incluindo a eficiência energética, uso e consumo de energia, a ISO 50001 pretende conduzir a uma redução das emissões de gases com efeito de estufa e outros impactes relacionados, bem como a redução dos custos de energia (NP EN ISO 50001:2012). Nesta norma são especificados os requisitos para o desenvolvimento de SGE que permitem desenvolver e implementar a política energética, objetivos, metas e planos de ação tendo em conta as exigências legais e informações relativas ao uso significativo de energia. São determinados como requisitos as responsabilidades da gestão de topo e do seu representante, aspetos relacionados com a política energética, o planeamento energético, implementação e operação

¹ O consumo de uma instalação é calculado com base no fator de conversão para tonelada equivalente de petróleo expresso na Portaria n.º 17313/2008.

(estabelecimento de objetivos e metas energéticas, planos de ação, comunicação e documentação, entre outros), verificação (monitorização, medição, análise de informação, auditorias internas, entre outros) e a revisão pela gestão. Sendo baseada na metodologia PDCA (*Plan-Do-Check-Act*), um SGE assenta numa abordagem iterativa para se atingir a melhoria contínua, incorporando a gestão da energia nas práticas diárias das organizações (Figura 2). Um aspeto importante sobre esta norma é que ela pode ser aplicada a organizações de todos os tipos e dimensões, e em quaisquer condições geográficas, culturais ou sociais.



Figura 2 – Modelo PDCA para a melhoria contínua de um SGE (NP EN ISO 50001:2012).

Como integrante da família ISO 50000, a ISO 50002 debruça-se, por sua vez, sobre as auditorias energéticas, contendo os requisitos e orientações para o seu uso. Esta norma define o conjunto mínimo de requisitos que permitirão a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho energético. São estabelecidos os princípios em que a auditoria energética está fundamentada e que a tornam uma ferramenta eficaz e confiável no apoio a tomada de decisões e controlo, e também o esquema de desenvolvimento da auditoria: planeamento, reuniões, recolha de dados e medições, visitas aos locais, análises e elaboração de relatórios. Ainda segundo esta norma, os resultados da auditoria incluem informações sobre a utilização e desempenho atual e fornecem recomendações ordenadas para a melhoria em termos de desempenho energético e de benefícios financeiros. Pode ser usada tanto nos termos da ISO 50001 ou de forma independente. Pode ser aplicável a todos os tipos de estabelecimentos e organizações, e a todas as formas e uso de energia (NP ISO 50002:2017).

Além de normas gerais que podem ser aplicadas em qualquer organização, existem normas específicas, como é o caso da DWA-A 216E (2015). Esta norma, em particular, resulta de décadas de discussões entre especialistas em como se deve avaliar a situação energética de uma ETAR. Esta norma introduz a “medição energética” e a “análise energética” como ferramentas para a otimização energética de sistemas de tratamento de águas residuais e contém os requisitos para a utilização desses métodos. Ela especifica as exigências de dados e partes envolvidas (fatores de sucesso, volume e qualidade e verificação de plausibilidade dos dados), uma caracterização abrangente de uma medição energética preliminar e uma meticulosa instrução de uma análise energética contendo avaliação económica e requisitos de reporte de resultados. Na medição energética, são introduzidos vários indicadores de desempenho específicos a diferentes unidades das ETAR, aplicáveis a ETAR de qualquer dimensão e com qualquer tecnologia de tratamento, e utilizadas curvas de frequência como base de comparação para o desempenho. Já na análise energética, é requerido: (1) um levantamento do estado atual do funcionamento da ETAR; (2) a criação de uma matriz de consumos e a elaboração do balanço energético do estado atual; (3) a determinação dos valores ideais de funcionamento (com fórmulas específicas para cada tipo de operação/equipamento e tipo de tecnologia utilizada); (4) avaliação do estado atual e identificação de medidas; (5) determinação do potencial de poupança e eficiência económica das medidas; (6) formação de conjuntos de medidas e ordens de prioridade; e (7) reporte de resultados.

Uma comparação das duas normas é apresentada no Quadro 6.

Quadro 6 – Comparação entre as normas ISO 50002:2017 e DWA-A 216E (2015).

	ISO 50002:2017	DWA-A 216E (2015)
DIFERENÇAS	<ul style="list-style-type: none"> - Aplica-se a todo o tipo de organizações e estabelecimentos; - Possui uma abrangência lata, incluindo também questões organizacionais. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplica-se apenas a ETAR; - Incide principalmente sobre a medição e a análise do consumo energético, podendo ser incluída no esquema de auditoria da ISO 50002, quando aplicada a uma ETAR.
SEMELHANÇAS	<ul style="list-style-type: none"> - Abrangem a utilização e o desempenho energético; - Podem ser utilizadas no âmbito de um SGE; - Aplicam-se a todo o tipo de energia; - Exigem a determinação da eficiência económica das medidas; - Terminam com a elaboração de um relatório. 	

1.3 Objetivos

Sabendo que as ETAR constituem um importante consumidor energético, torna-se imprescindível, até mesmo devido às obrigações legais, a avaliação da sua situação energética e a procura de formas de reduzir o seu consumo e de contribuir para a eficiência energética.

O presente trabalho foi desenvolvido em colaboração com a empresa “Centro Tecnológico de Gestão Ambiental” (CTGA), e teve como objetivo o desenvolvimento de um método de análise e atuação sobre o desempenho energético de ETAR na realidade portuguesa, contribuindo para a prossecução da eficiência energética destas infraestruturas. Em concreto, este trabalho visou: (1) o desenvolvimento de uma metodologia para a determinação e levantamento do desempenho energético de uma ETAR, com base em normas de auditoria, na legislação vigente e no estado da arte; e (2) a realização de uma auditoria energética, com a metodologia desenvolvida, na ETAR de Espinho, distrito de Aveiro, englobando a caracterização do consumo energético da infraestrutura e a identificação e quantificação de medidas de melhoria energética.

O presente relatório apresenta os principais resultados deste trabalho, que, em termos de estrutura, está constituído por 4 capítulos, incluindo a presente introdução. No capítulo 2 é feita a sistematização e descrição da metodologia adotada, no capítulo 3 são relatados os resultados encontrados ao longo do trabalho, sendo feita uma discussão dos aspetos relevantes para a prossecução dos objetivos, e no capítulo 4 são sistematizadas as principais conclusões e sugestões de melhoria em relação ao método e ao objeto de estudo. Apresenta-se em apêndices elementos realizados considerados relevantes para uma melhor compreensão do trabalho.

2. Metodologia

Uma vez que uma auditoria é um trabalho que assenta grandemente numa perspetiva procedimental, é importante realçar que um dos principais focos deste trabalho reside no estudo do método de auditoria.

2.1 Sistematização e planeamento de auditoria

O presente trabalho foi desenvolvido na sequência de um procedimento pré-contratual para a aquisição de serviços de auditorias energéticas no âmbito do Decreto-Lei n.º 68-A/2015, de 30 de abril, que estabelece disposições em matéria de eficiência energética e produção em cogeração, pelo que se utiliza o conceito de “Auditoria Energética” constante no referido diploma, embora se utilize os métodos de levantamento e análises técnicas constantes na norma alemã DWA-A 216E (2015). O caso de estudo foi a ETAR de Espinho, sob a gestão da empresa SIMRIA e sob exploração da empresa CTGA, situada no concelho de Espinho, distrito de Aveiro.

Para a sistematização das fases do trabalho, começou-se por fazer um levantamento do estado da arte e informação disponível sobre auditorias energéticas e tomou-se a decisão de adotar a norma DWA-A 216E (2015) como base.

A seguir reuniram-se os registos e relatórios dos consumos energéticos, de operação e desempenho das diferentes unidades, bem como da documentação de conceção e construção, de equipamentos, desenhos e diagramas e os detalhes elétricos, de instrumentação e controlo.

A auditoria foi feita em dois momentos: (1) um levantamento e avaliação inicial dos consumos dos principais equipamentos, culminando com a sua comparação com valores característicos de curvas de frequências específicas (medição energética) e (2) uma pesquisa e avaliação detalhada da situação energética culminando com a elaboração de medidas de otimização, incluindo as suas análises custo/benefício (análise energética). A auditoria foi executada conforme ilustra a Figura 3.

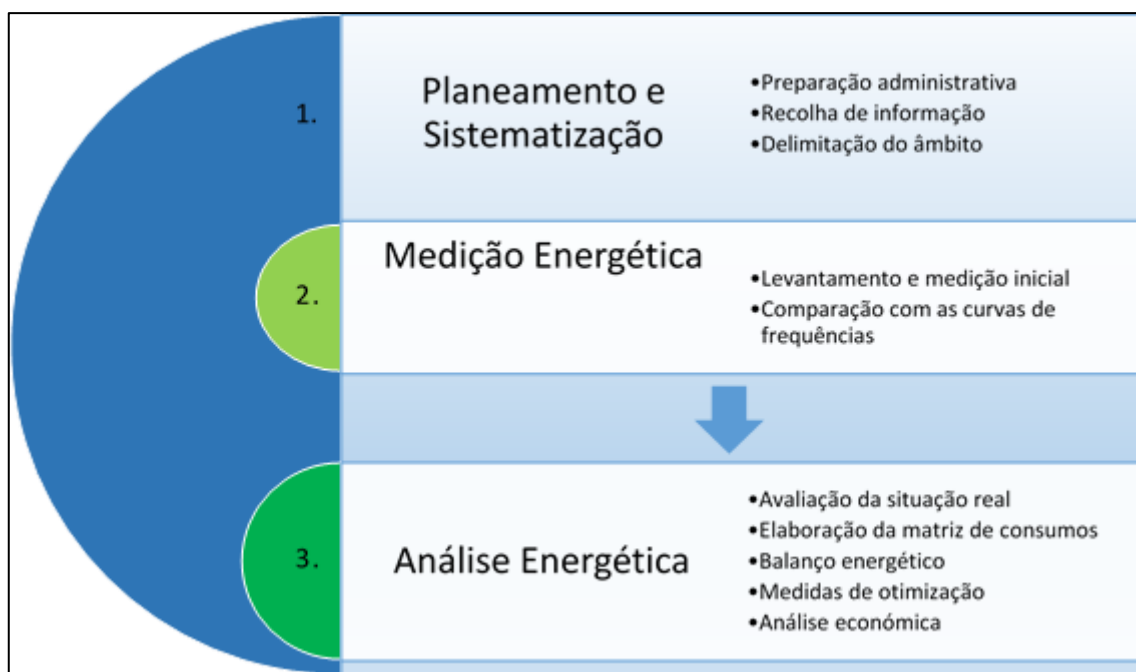


Figura 3 – Esquema de sistematização da auditoria energética.

2.1.1 Preparação administrativa e delimitação de unidades

Foi determinado pela gestão de topo da empresa CTGA um líder encarregue de coordenar a equipa de auditoria energética, com autoridade para recolher e proceder aos registos de dados e levantamentos dos estados das instalações e equipamentos. Foi dado acesso ao pessoal de apoio com competência nas diversas áreas de operação das instalações da ETAR. Foram também alocados recursos para a realização das atividades necessárias e delineado um plano geral das atividades a realizar em escala temporal (Apêndice B – Plano temporal de atividades).

As unidades de auditoria foram divididas segundo uma perspetiva de processo, seguindo as diferentes etapas do tratamento da fase líquida, fase sólida e fase gasosa e os processos classificados por tipologia, de acordo com a finalidade dos equipamentos que contêm, e divididos em níveis para posterior aplicação dos indicadores específicos (Figura 4; Apêndice C – Delimitação de unidades).

2.2 Medição energética

Para fazer o levantamento inicial para a medição energética determinaram-se indicadores de desempenho por unidades (quer seja uma fase ou considerando-se o sistema de tratamento como uma unidade) e as informações necessárias para o seu cálculo.

Foram determinados 8 indicadores para diferentes unidades (Figura 4), com base nos seus consumos energéticos, habitantes equivalentes de carga orgânica (CQO), caudais de operação e produção e alturas manométricas, e fez-se o cálculo dos mesmos de acordo com a norma DWA-A 216E (2015) (Quadro 7):

Quadro 7 – Lista de indicadores e respetivas fórmulas de cálculo

Nº	Símbolo	Unidade	Fórmula	Descrição
1	$e(tot)$	kWh/hab.ano	$e(tot) = \frac{E(tot)}{Hab.eq(CQO)}$	<u>Consumo específico total da ETAR</u> (etot), calculado como a relação entre o consumo energético total (E) e o número de habitantes equivalentes por carga de CQO (Hab.eq)
2	$e(arj)$	kWh/hab.ano	$e(arj) = \frac{E(arj)}{Hab.eq(CQO)}$	<u>Consumo específico do sistema de arejamento</u> (earj), calculado como a razão entre o consumo total do sistema de arejamento (E) e o número de habitantes equivalentes por carga de CQO (Hab.eq)
3	$p(BG)$	l/hab.dia	$p(BG) = \frac{Q(bg)}{Hab.eq(CQO)}$	<u>Produção específica de biogás por habitante equivalente</u> (pBG), dado pelo caudal de biogás a temperatura e pressão padrão (Qbg) em relação ao número de habitantes equivalentes por carga de CQO (Hab.eq)
4	$p(BGorg)$	l/kg	$p(BGorg) = \frac{Q(bg)}{L(org.sc)}$	<u>Produção específica de biogás por massa orgânica seca</u> (pBGorg), dado pelo caudal de biogás em relação a massa orgânica seca (Lorg.sc)

Nº	Símbolo	Unidade	Fórmula	Descrição
5	$T(eBG)$	%	$T(eBG) = \frac{E(co) \times 100}{Q(bg) \times gCH4 \times 10}$	<u>Taxa de conversão de biogás em eletricidade</u> (TeBG), como a relação entre a energia produzida pela cogeração (Eco) e o produto do caudal de biogás produzido (QBG) e a proporção de metano presente no biogás (gCH4)
6	ASE	%	$ASE = \frac{EP}{E(tot)} \times 100$	<u>Grau de autossuficiência energética</u> (ASE), determinada pela relação de energia produzida (EP) e a consumida (Etot)
7	$e(b)$	Wh/m³.m	$e(b) = \frac{E(b) \times 1000}{Q(b) \times h}$	<u>Consumo específico das estações de bombagem</u> (eb), como a relação entre a energia consumida (Eb) e o produto do caudal (Qb) e a altura manométrica (h em metros)
8	$e(ext)$	kWh/hab.ano	$e(ext) = \frac{E(ext)}{Hab.eq(CQO)}$	<u>Consumo externo específico de calor</u> (eext), dado pela relação entre a energia térmica externa em kWh (Eext) e o número de habitantes equivalentes na base de CQO (Hab.eq)

Procedeu-se à “medição energética” (cálculo dos indicadores e posterior comparação com curvas de frequências) numa base histórica com os dados disponíveis dos anos 2016 e 2017 (em alguns indicadores, desde 2015) com o objetivo de se encontrarem os padrões de funcionamento normais e mais recentes da ETAR, e determinar uma linha de referência do desempenho da mesma. A linha de referência foi determinada tendo apenas como condicionante o fator disponibilidade de dados.

Os dados necessários para a medição energética foram extraídos dos relatórios de atividade da ETAR para os respetivos períodos, de diagramas de processos e telas finais, plataformas de registo de consumos, sistema de gestão e supervisão da ETAR, medições *in situ* e medições indiretas por Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

O consumo das bombas de recirculação foi calculado por estimativa a partir dos registos de consumo do quadro elétrico completo. Foi feita uma amostragem das potências absorvidas do funcionamento das bombas num período de três semanas (22/05 a 12/06 de 2018), com base nas quais se calculou os consumos das bombas, e posteriormente se determinou as percentagens dos consumos das bombas em relação ao quadro

completo. Essa percentagem foi aplicada aos consumos do quadro QE05 dos anos anteriores para se calcular o consumo das bombas para esses anos. Dado que a ETAR de Espinho possui quatro decantadores e cada decantador possui uma estação de 1+1 bombas, fez-se a determinação das bombas de cada decantador em separado e posteriormente calculada a média entre todas elas para se determinar o consumo do sistema de recirculação.

O consumo dos arejadores foi calculado pelo produto do tempo de funcionamento ao longo do ano, a potência nominal de cada e um coeficiente de correção de perdas de 0,8 ($C_{\text{arejadores}} = \text{Potência} \times \text{tempo} \times 0,8$).

Depois de calculados, os valores característicos encontrados de cada indicador foram comparados com as curvas de frequências correspondentes da norma DWA-A 216E e tiradas as possíveis ilações.

2.3 Análise energética

2.3.1 Determinação da situação atual e matriz de consumos

Para o início da análise energética, foi feita uma inspeção do funcionamento atual da ETAR e revistos os desvios operacionais da documentação de base (projeto base/execução, diagramas de processo, manuais de instrução/operação, etc.), bem como fraquezas e potenciais de melhoria procedimentais e energéticas.

Foi utilizada a descrição do processo resultante da avaliação inicial (Figura 4) e foi criada uma lista de grupos baseada na delimitação de unidades também feita inicialmente (Apêndice C – Delimitação de unidades), sendo usada como base para a matriz de consumos. Para a lista de grupos fez-se um levantamento das características elétricas de cada equipamento (especificações elétricas, o ano de implementação, a determinação do quadro elétrico a que se encontram ligados e os sistemas de monitorização de que são objeto) em cada grupo que constitui o processo de tratamento, sendo considerado um grupo o conjunto de equipamentos que funcionam no mesmo processo ou fase do tratamento.

Foram identificados os equipamentos e grupos pertinentes para a medição, mas dada a limitação de disponibilidade de aparelhos de medição (poucos analisadores de energia e pinças amperimétricas em relação ao número de equipamentos a medir) e outros constrangimentos logísticos, não foi possível fazer medições dos consumos de todos grupos.

2.3.2 Determinação dos valores de referência

De modo a proporcionar uma base de comparação dos consumos que seriam registados com alguma referência para a concretização da análise, foram determinados os valores de referência dos consumos energéticos dos grupos com base nas fórmulas de cálculo específicas da norma DWA-A 216E. Foram recalculados os valores característicos de conceção dos diferentes grupos da ETAR (parâmetros do tratamento que dependam de caudais de entrada, saída e recirculação, necessidades de oxigênio para o tratamento biológico, etc., para os quais foram utilizados os dados de projeto) incidindo-se sobre os grupos que se revelaram mais importantes durante a medição energética.

2.3.3 Análise técnico-económica das medidas de otimização

A determinação de medidas de melhoria e eficiência energética deve ser o principal resultado de uma auditoria energética. O presente trabalho tinha como objetivo determinar medidas de melhoria com base nas observações e comparações das medições feitas nos diferentes grupos com os valores de referência calculados. Depois de determinadas, cada medida seria avaliada de acordo com o seu consumo em condições de funcionamento normais e calculados os custos de energia de cada medida. Posteriormente, os custos de energia determinados para cada medida seriam comparados com os custos atuais. Todavia, esta etapa não foi desenvolvida no âmbito deste estágio por limitações de tempo, sendo uma tarefa proposta como trabalho futuro.

2.4 Cumprimento do plano de trabalhos

Uma vez que uma auditoria é um trabalho que assenta grandemente numa perspetiva procedimental, é importante realçar que um dos principais focos deste trabalho reside no estudo do método de auditoria. Deste modo, foi redigido o desenvolvimento da metodologia que se esperava atingir, muito embora não foi possível concretizá-la na íntegra. Como se pode ver na Figura 5, o processo de auditoria engloba (1) o planeamento e sistematização, que foi cumprido durante todo o processo, (2) uma medição energética, que também foi realizada e (3) uma análise energética que foi apenas parcialmente cumprida, por limitações de tempo, não tendo sido possível determinar o balanço energético, as medidas de otimização e fazer a análise económica das medidas. Estas serão, portanto, tarefas a propor como trabalho futuro.

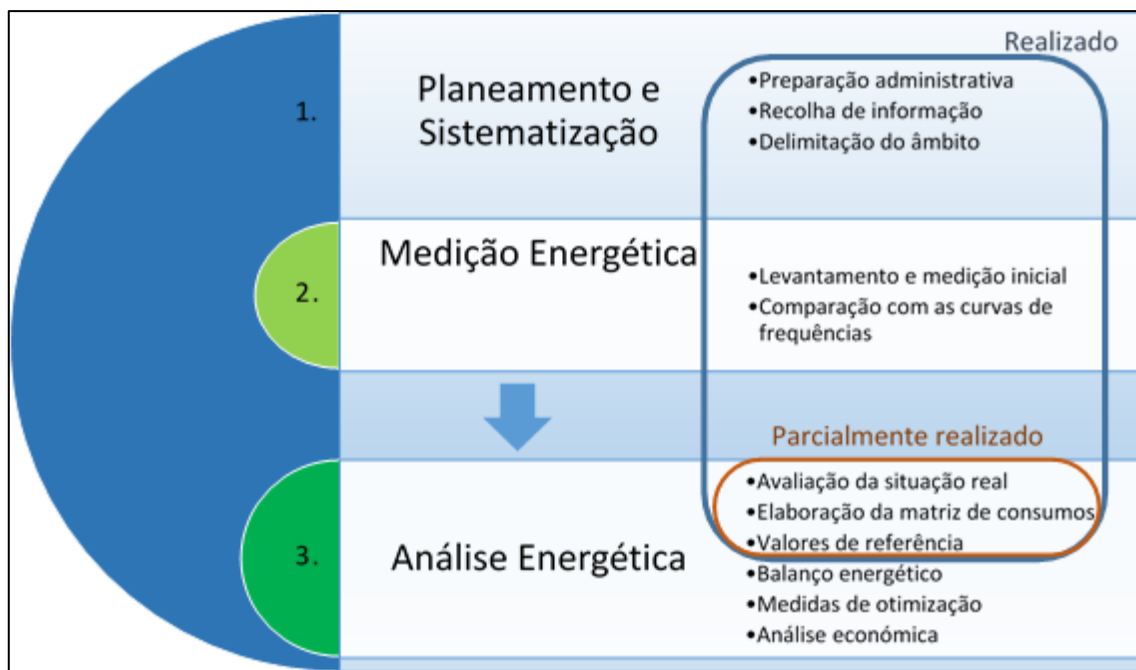


Figura 5 – Esquema de auditoria e extensão em que foi cumprida.

3. Resultados e discussão

3.1 ETAR de Espinho

Sob a gestão da **SIMRIA – Saneamento Integrado dos Municípios da Ria de Aveiro, S.A.**, a ETAR de Espinho faz parte de um conjunto integrado de recolha, tratamento e rejeição de efluentes que abrange 13 municípios, em conjunto com a ETAR Norte, ETAR Sul, ETAR de S. Jacinto e a ETAR da Remolha, funcionando este em ligação com estruturas de recolha constituídas por 7 intercetores e 5 emissários. Esta ETAR foi dimensionada para 200.000 habitantes, projetada para tratar os efluentes provenientes dos concelhos de Espinho, Ovar (parte), e Santa Maria da Feira, tendo uma capacidade de tratamento de 18.300 m³ (SIMRIA, 2011). Está localizada no município de Espinho a 3 km a sul do centro da cidade de Espinho (40°58'29.49"N e 8°38'52.87"W) (Figura 6).

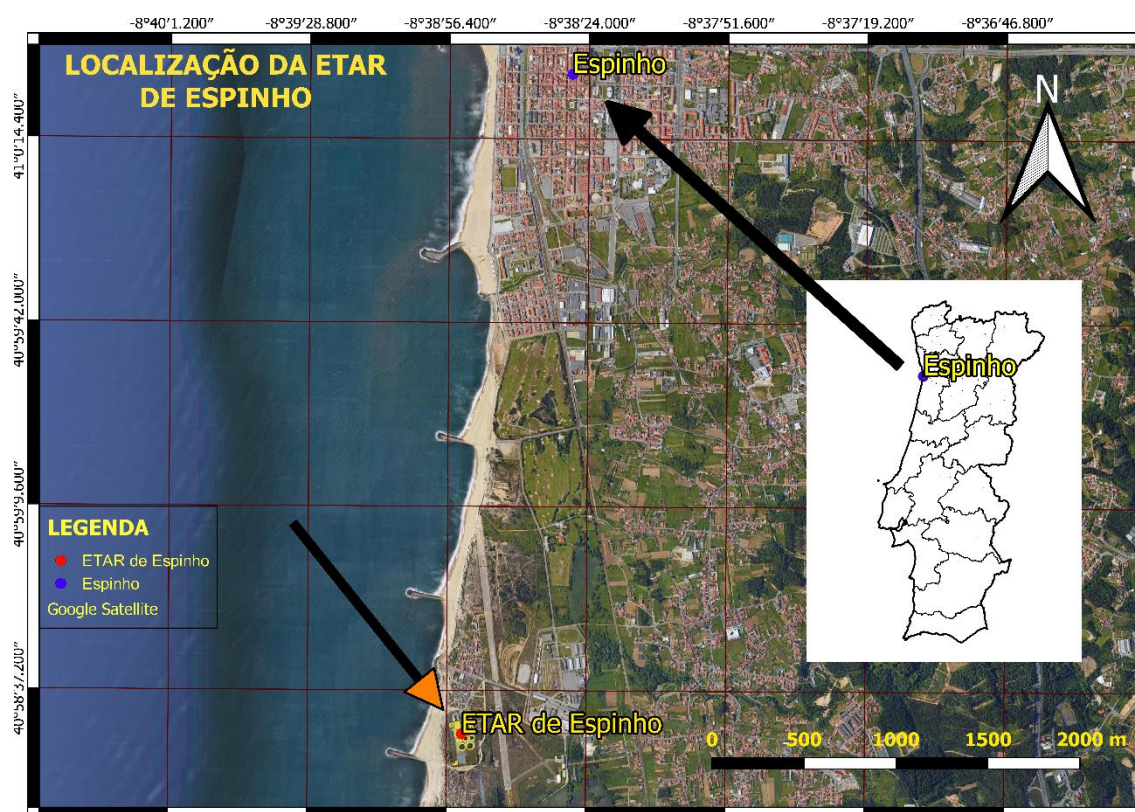


Figura 6 – Localização da ETAR de Espinho em relação a cidade de Espinho.

A ETAR de Espinho funciona com três estágios de tratamento: um tratamento preliminar, um tratamento primário e um tratamento secundário (tratamento biológico e decantação secundária), com estações elevatórias a montante e a jusante do tratamento completo, como mostra a Figura 7.

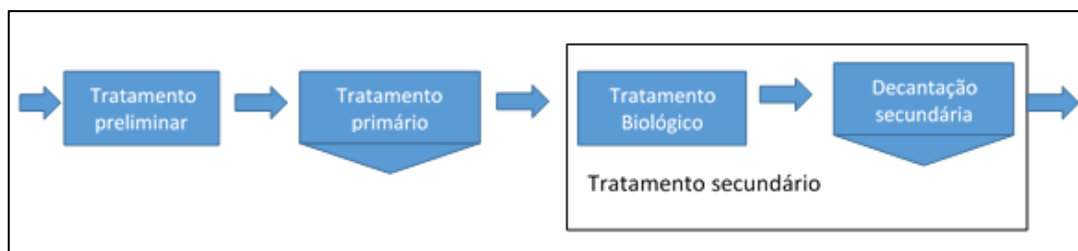


Figura 7 – Esquema simplificado do funcionamento da ETAR de Espinho

3.1.1 Pré-tratamento e decantação primária

O pré-tratamento compreende um conjunto de operações que visam preparar o afluente para os processos de tratamento subsequentes. Neste caso observam-se uma elevação inicial, gradagem e tamisação, desarenação, desengorduramento e coagulação/floculação antes da decantação primária (Figura 8).

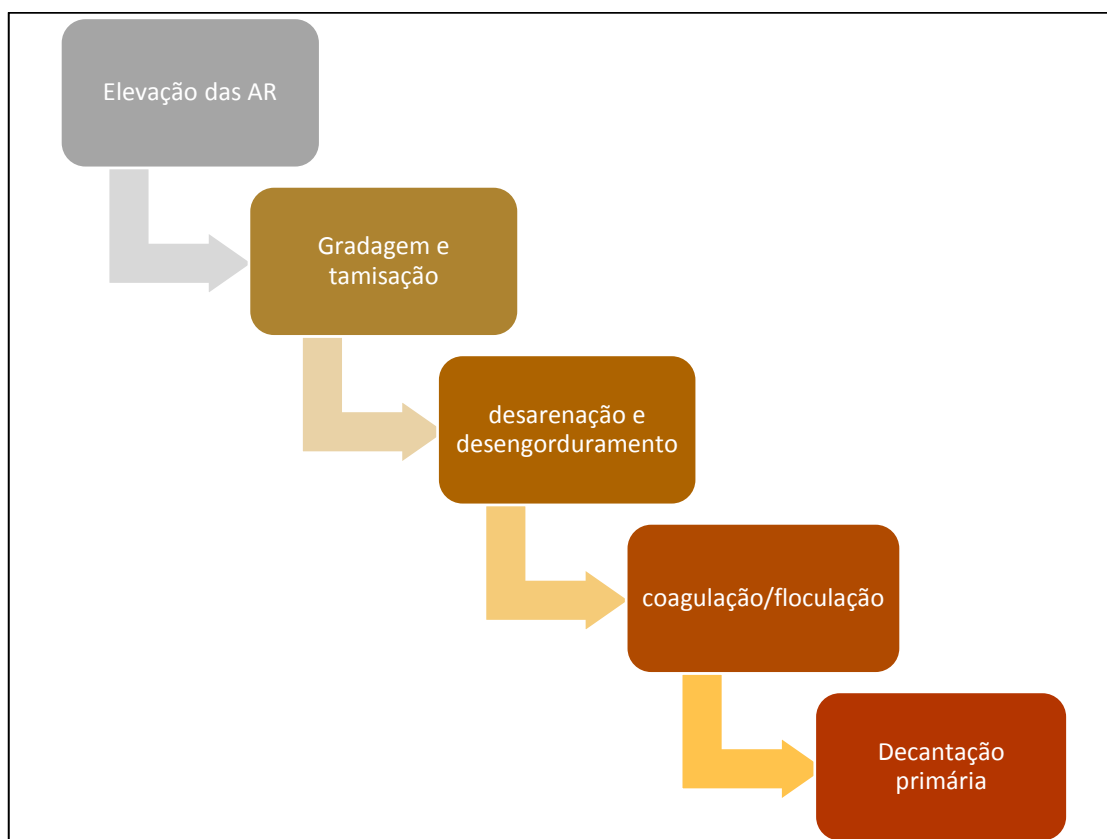


Figura 8 – Esquema do tratamento preliminar e primário.

As águas residuais são elevadas para uma cota capaz de promover o seu transporte gravítico até ao meio recetor por intermédio de três parafusos de Arquimedes (Figura 9, A), estando normalmente só um em funcionamento. Após a sua elevação, as águas residuais passam através de uma grade de limpeza mecânica e um tamisador para

remoção dos sólidos grosseiros (Figura 9, B) passando em seguida através de dois desarenadores mecânicos tipo pista, acoplados a um sistema de separação e descarga das areias removidas (classificador de areias), e um sistema de desengorduramento com difusores para promover a separação das gorduras (Figura 9, C). Posteriormente à remoção dos sólidos grosseiros, as águas residuais são conduzidas, através de um canal, até um tanque onde é realizado uma pré-precipitação química. Posteriormente, os efluentes seguem para os decantadores primários (Figura 9, D) através de uma câmara de repartição. Após a decantação, as lamas são separadas dos efluentes e enviadas para os espessadores gravíticos. Os efluentes já decantados são enviados para o tratamento biológico. O ar do interior do edifício de obra de entrada é extraído através de um ventilador e passa por um processo de desodorização antes de ser enviado para o exterior.



Figura 9 – Obra de entrada e decantação primária: (A) elevatória inicial; (B) gradagem e tamisação; (C) desarenação e desengorduramento; (D) decantação primária.

3.1.2 Tratamento biológico e decantação secundária

O tratamento biológico das águas residuais é feito em tanques de arejamento onde são misturadas com a biomassa em suspensão (lamas ativadas), a qual desenvolve o processo da sua biodegradação, na presença de oxigénio.

Em cada um dos três tanques estão instaladas três turbinas arejadoras de superfície que fornecem o oxigénio à biomassa, além de promoverem a sua suspensão em massa

homogénea. Ao fim de um tempo de retenção conveniente, a mistura de biomassa e substrato remanescente é conduzida a uma câmara de repartição que efetua a sua distribuição pelos decantadores secundários (Figura 10).

Nos decantadores secundários é feita a separação dos flocos biológicos do efluente tratado, seguindo este para a estação elevatória final, enquanto os sólidos sedimentados são extraídos dos decantadores para o espessamento mecânico, sendo uma parte posta em recirculação para o reator biológico através de bombas de recirculação de modo a garantir a concentração adequada de biomassa ativa no reator.

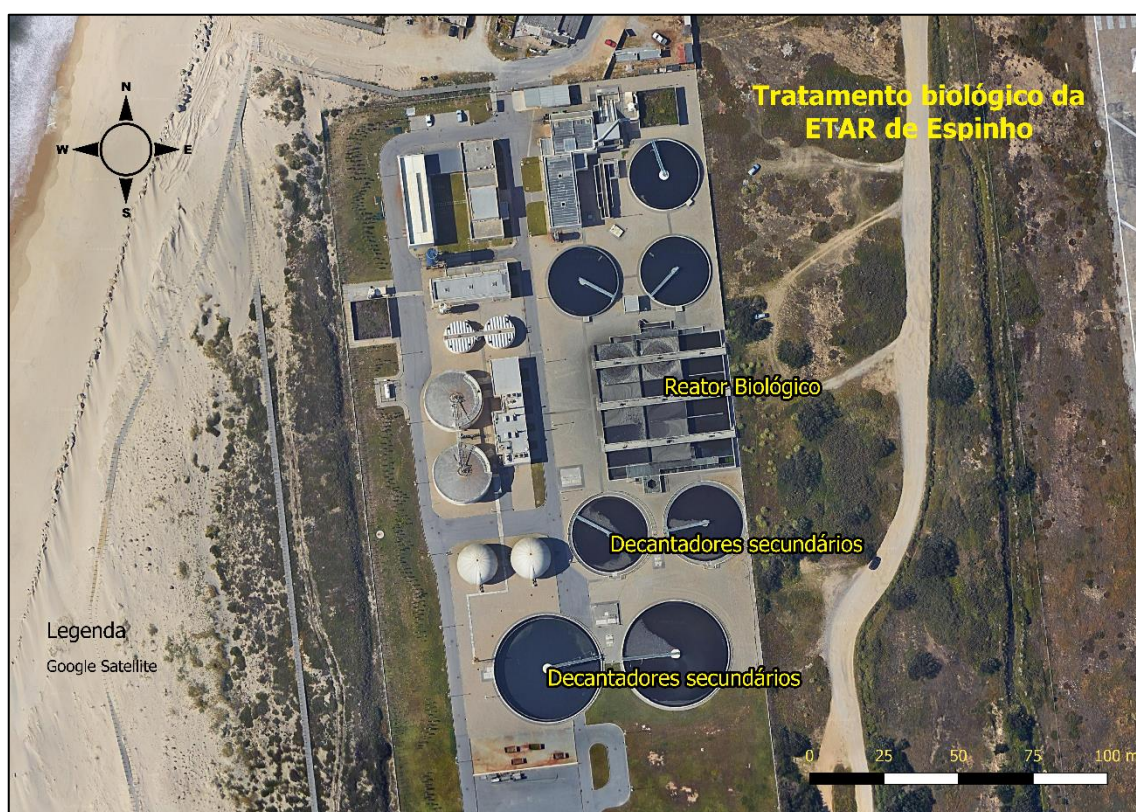


Figura 10 – Reator biológico e decantadores secundários na ETAR de Espinho.

3.1.3 Estação elevatória final

Este setor tem como finalidade bombear a água para o seu ponto final de descarga, que, neste caso específico, será no fundo do Oceano Atlântico, a quatro quilómetros da costa. O grupo de bombas faz a elevação da água residual tratada para uma câmara de carga a uma cota mais elevada que a maré, e de lá, escoar por gravidade.

3.1.4 Espessamento de lamas

Anterior à digestão anaeróbia das lamas, tanto as lamas primárias quanto as biológicas, são sujeitas a um espessamento com vista ao aumento da concentração de sólidos. As lamas primárias seguem dos decantadores primários para os espessadores gravíticos (Figura 11, A) onde é facilitado o desprendimento da água, enquanto as lamas biológicas são conduzidas dos decantadores secundários para tambores rotativos (Figura 11, B) onde é feito o seu espessamento mecânico. Depois de espessadas as lamas, estas são encaminhadas para um tanque de lamas mistas, para onde são também enviadas as escumas e os óleos e gorduras, de onde são bombeadas para os digestores anaeróbios.



Figura 11 – Espessamento gravítico de lamas primárias (A) e espessamento mecânico de lamas biológicas (B).

3.1.5 Digestão anaeróbia

Com o objetivo de mineralizar a matéria orgânica, os digestores recebem as lamas espessadas e promovem a sua degradação em meio anaeróbio (Figura 12, A). As temperaturas de operação dos digestores são mantidas entre 30 a 35°C através da extração e circulação das mesmas por permutadores de calor ligados em circuito com a cogeração ou pelo aquecimento direto pela caldeira. De modo a manter as condições de mistura, o biogás produzido é extraído do topo dos digestores e injetado novamente no fundo através de três compressores. Depois da digestão, o biogás produzido é armazenado em gasômetros de membrana (Figura 12, B).

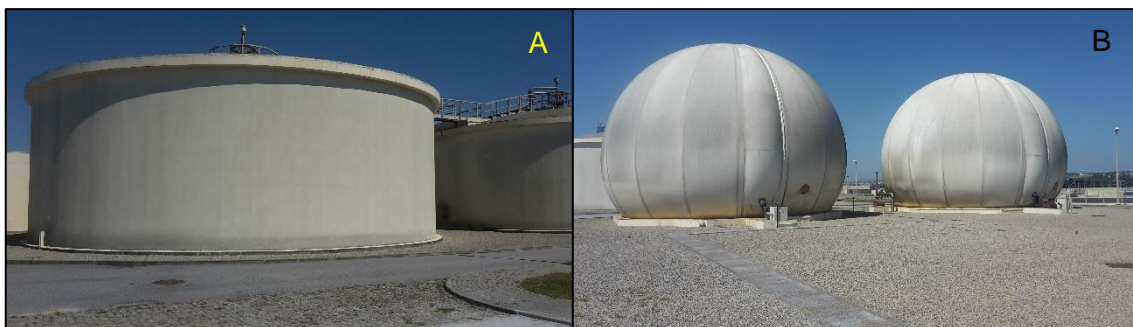


Figura 12 – Digestores anaeróbios (A) e Gasómetros (B).

3.1.6 Desidratação de lamas

Depois de digeridas, as lamas são primeiro misturadas com uma solução de polieletrólito de modo a facilitar a remoção da água livre, antes de serem introduzidas em centrífugas, onde chegam a atingir 30% de matéria sólida, sendo esta bombeada para o silo de armazenamento de lamas desidratadas, de onde são retiradas por camiões de transporte para destino final.

Também nesta fase o ar circulante é removido por ventiladores e é encaminhado para biofiltros de desodorização, antes de ser expelido para a atmosfera.

3.1.7 Cogeração e central térmica

A ETAR de Espinho possui dois grupos motogeradores assíncronos, os quais produzem energia elétrica e térmica a partir do biogás. Antes de ser utilizado nos motogeradores, o biogás sofre um processo de tratamento com vista a eliminar impurezas. A energia elétrica gerada pelos motogeradores é utilizada para injeção na rede nacional de distribuição. Em relação à energia térmica, esta é aproveitada através de permutadores de calor e encaminhada para a digestão anaeróbia. Quando a cogeração se encontra parada, o fornecimento da energia térmica aos digestores é promovido pelo funcionamento da caldeira.

3.1.8 Processos acessórios

3.1.8.1 Serviços administrativos

Nas instalações da ETAR de Espinho existe um edifício de escritórios referente ao setor administrativo, gabinetes de serviços de apoio à produção/planeamento, laboratório de análise, sala de refeições, sala de reuniões e sala de controlo por telegestão.

3.1.8.2 Iluminação

As instalações possuem iluminação do tipo de iodetos metálicos, fluorescentes tubulares T8, de descarga de vapor de sódio e fluorescentes compactas. Podem-se distinguir diferentes zonas da ETAR com iluminação, como a zona de produção, zonas técnicas, escritórios e exterior.

3.2 Medição energética

Para a realização da medição energética é importante notar que houve alguma dificuldade na aquisição de dados, dado que alguns dos valores necessários não são normalmente medidos na operação da ETAR, tendo sido necessário estimar os consumos a partir de dados conhecidos. Por outro lado, os valores dos consumos energéticos e parâmetros de funcionamento utilizados para a determinação não sofreram ajustamento dos fatores climáticos dos respetivos anos, como sugere, o *International Performance Measurement and Verification Protocol* (IPMVP), fator que pode ser levado em conta em trabalhos futuros.

Os resultados obtidos para cada indicador (apresentados no Quadro 7) para cada ano podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados dos indicadores de desempenho para os períodos em estudo. (s.d. significa “sem dados”)

Nº	Indicador	Unidade	Resultado		
			2015	2016	2017
1	Consumo específico da ETAR	kWh/hab.ano	s.d.	29,56	28,93
2	Consumo específico dos arejadores	kWh/hab.ano	s.d.	8,38	10,37
3	Produção de biogás por habitante equivalente	l/hab.dia	s.d.	10,56	13,00
4	Produção de biogás por massa orgânica seca	l/kg	s.d.	323,01	413,76
5	Taxa de conversão de biogás em eletricidade	%	12,6	12,6	11,33
6	Taxa de autossuficiência energética	%	40,78	31,86	34,19

Nº	Indicador	Unidade	Resultado		
			2015	2016	2017
7.1	Bombas elevatórias iniciais	Wh/m ³ .m	4,68	11,04	11,78
7.2	Bombas de recirculação	Wh/m ³ .m	s.d.	s.d.	6,34
7.3	Bombas elevatórias finais	Wh/m ³ .m	6,29	7,59	5,86
8	Consumo de calor externo específico	kWh/hab.ano	0	0	0

1. Consumo específico total da instalação:

Os consumos da ETAR para 2015, 2016 e 2017 foram de 2,68 GWh/ano, 2,86 GWh/ano e 2,66 GWh/ano respetivamente. Não tendo sido possível apurar a carga orgânica para 2015, as cargas orgânicas de CQO em 2016 atingiram valores de 12 959,93 kg/d e de 11 587,32 kg/d em 2017, resultando em 107 999 habitantes equivalentes (a capitação de 0,12 kg/hab.dia) para 2016 e 96 561 para 2017 (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores do consumo energético, carga orgânica e habitantes equivalentes da ETAR de Espinho para 2015, 2016 e 2017. (s.d. significa "sem dados").

Dados	2015	2016	2017
Consumo energético total (GWh/ano)	2,68	2,86	2,66
Carga orgânica (kg/d)	s.d.	12 959	11 587
Habitantes equivalentes (nº)	s.d.	107 999	96 561

Quanto ao peso dos processos sobre o consumo energético da ETAR para o ano de 2017, o maior peso foi dos arejadores de superfície (37,36%) seguido pelo tratamento de lamas e afins (16,45%), de outros consumos não discriminados (11,94%), da obra de entrada (10,19%), a elevatória final (8,62%), do sistema de recirculação (7,81%), da elevatória inicial (6,09%) e por último pelos edifícios de apoio (1,53%) (Figura 13).

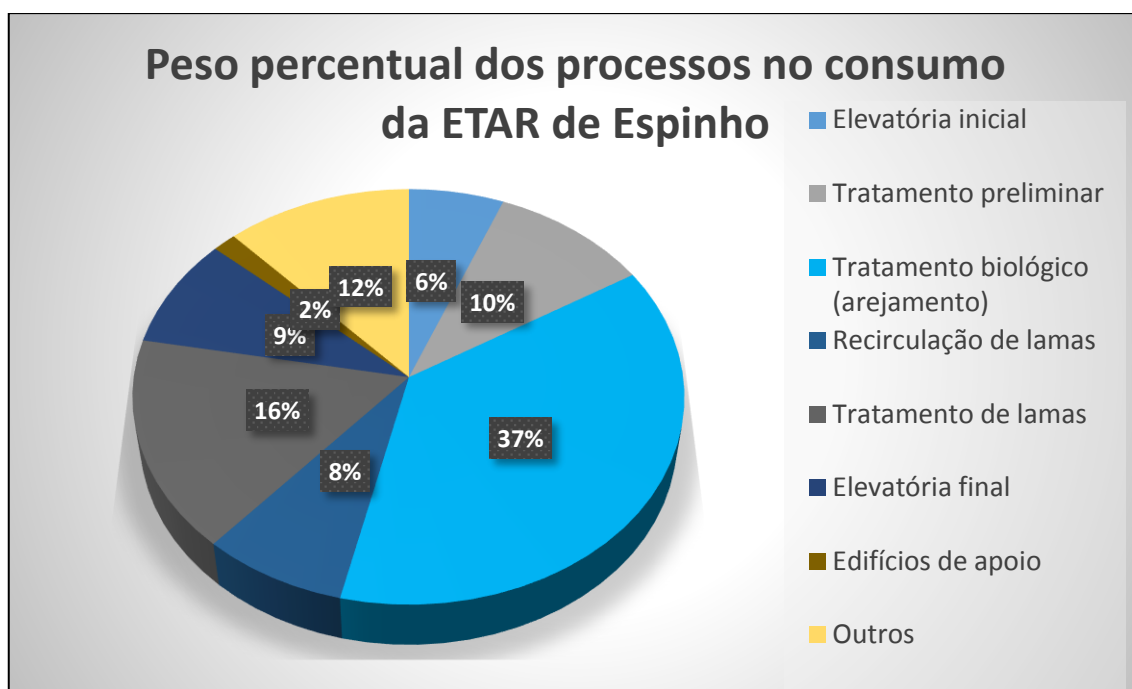


Figura 13 – Peso do consumo dos processos em relação ao consumo total da ETAR de Espinho

Com base nos resultados obtidos, o consumo específico da ETAR por habitante equivalente correspondeu a 29,56 kWh/hab.ano em 2016 e 28,93 kWh/hab.ano para 2017, encontrando-se abaixo de 33 kWh/hab.ano, que é o percentil 50 da curva de frequências da norma DWA-A 216E (Figura 14). A norma DWA-A 216E recomenda que se considere que se o consumo específico estiver acima do percentil 50, existe uma oportunidade de melhoria que deve ser objeto de análise energética. Uma vez que não é o caso, já que na Figura 14 se observa os valores da ETAR na zona verde do gráfico (zona recomendável, isto é, abaixo do percentil 50).

Não obstante este resultado, o consumo específico da ETAR esteve sempre próximo de 28,9 kWh/hab.ano, que constitui o valor a que a ETAR foi concebida, sem cogeração e com todos os equipamentos a funcionar. O facto de a ETAR não ter utilizado todas as linhas de arejadores, por exemplo, significa que o consumo específico da ETAR devia ter sido inferior ao de conceção, o que denota ainda a possibilidade de se implementar algumas melhorias operacionais.

A principal dificuldade na obtenção do resultado deste indicador correspondeu à obtenção dos resultados históricos das cargas orgânicas ao longo de um ano, existindo a possibilidade de uma melhoria a nível da gestão dos registos de desempenho da ETAR. É assim recomendável que se criem mecanismos de melhor acesso a essa informação.

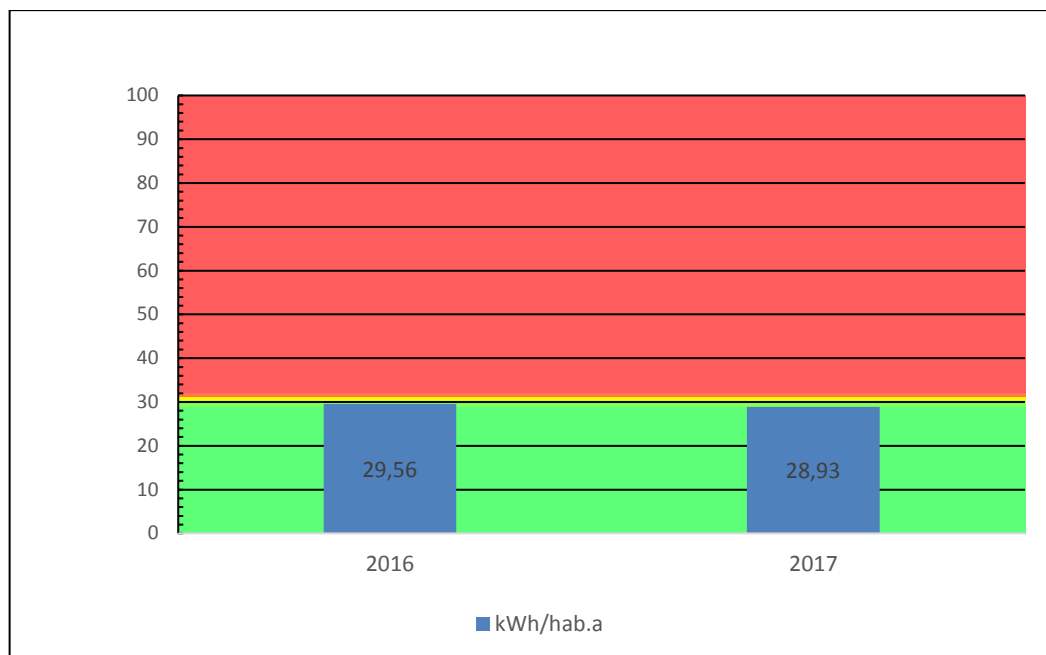


Figura 14 – Consumo específico por habitante equivalente da ETAR.

2. Consumo específico dos arejadores:

Com base nos dados adquiridos, os arejadores apresentaram consumos de 898,68 MWh/ano em 2016 e 995,39 MWh/ano para 2017. Em relação aos habitantes equivalentes daqueles anos (Tabela 3), os consumos específicos foram de 8,38 kWh/hab.ano para 2016 e 10,31 kWh/hab.ano para 2017, apresentando consumos específicos bastante abaixo de 16,9 kWh/hab.ano (percentil 50 da norma DWA-A 216E) (Figura 15), o que denota um funcionamento eficiente dos equipamentos. A norma DWA-A 216E recomenda que se o consumo específico estiver acima do percentil 50, existe imediatamente uma oportunidade de melhoria e deve ser objeto de análise energética, de modo que os resultados obtidos estão na zona verde. É importante notar que ao longo do período em estudo (2016 e 2017, até atualmente), nem todas as linhas de arejamento estavam a funcionar o que implicou uma subestimação dos consumos dos arejadores como unidade em relação ao funcionamento normal. Todavia, por ser a unidade de maior consumo na ETAR, e a primeira vez que se realiza uma medição a esta unidade, bem como apresentar um aumento de consumo específico ao longo dos dois anos avaliados, torna-se recomendável sujeitá-la a uma análise energética subsequente.

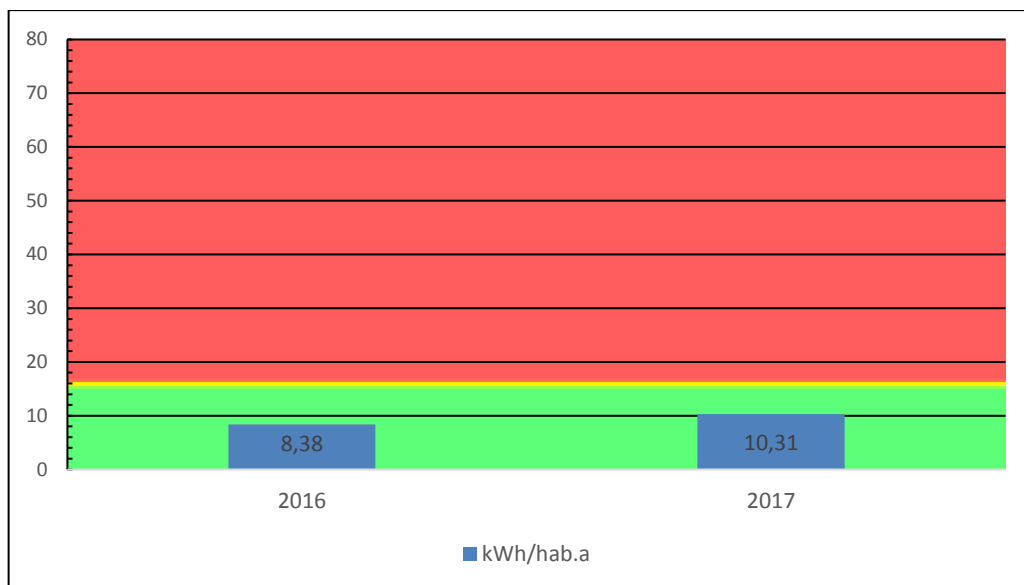


Figura 15 – Consumo específico dos arejadores por habitante equivalente

Nota-se que foi particularmente difícil obter os consumos dos arejadores, visto não ser usual serem realizadas medições em contínuo dos consumos energéticos destes órgãos, ou até, estes terem um quadro elétrico específico com um medidor dedicado. Por outro lado, ao se obter os tempos de funcionamento dos arejadores a partir do sistema de supervisão, notou-se que alguns resultados eram incongruentes, havendo períodos que cada equipamento funcionou mais de 24h por dia (o que é impossível).

Assim, para a facilitação de trabalhos futuros, sugere-se:

1. A implantação de um sistema de medição na instalação dos arejadores com sistema de registo e armazenamento de dados remoto para a obtenção dos consumos em contínuo, o que exige algum investimento, mas permite obter dados fiáveis e precisos;
2. A construção de um modelo dos consumos dos arejadores, dentro de um intervalo de tempo relativamente longo de funcionamento normal, e posteriormente determinada a razão deste perfil com o consumo global da instalação. Esta razão pode ser sempre utilizada no cálculo do consumo dos arejadores (pelo produto do consumo dos quadros gerais referentes a outros períodos) sem ser necessário medições adicionais, porém fornecerá apenas uma aproximação ao consumo real, o que é suficiente para a medição energética.

3. Produção de biogás por habitante equivalente:

A produtividade de biogás da ETAR foi de 1,14 dam³/dia em 2016 e de 1,26 dam³/dia em 2017. Em relação aos habitantes equivalentes (Tabela 3), os valores de produção de biogás em relação à população servida pela ETAR corresponderam a 10,56 l/hab.dia em 2016 e 13,00 l/hab.dia em 2017 (Figura 16). Estes resultados estão muito abaixo de 26 l/hab.dia (que é o percentil 50 das curvas de frequência da norma), o que implica com certeza um grande potencial de melhoria, dado que a norma indica que se considere que há um potencial de melhoria caso os resultados estejam abaixo do percentil 50 (zona vermelha no gráfico) e que deve ser alvo de uma análise energética. Para se melhorar a produção de biogás, é recomendável identificar os limitadores da taxa de degradação (balanço e disponibilidade de nutrientes, aumento da biomassa ativa, existência de inibidores ou melhoramentos a nível da desidratação da lama), otimização da agitação e escoamento, melhor monitorização e controlo da digestão e/ou introdução de substratos adicionais com elevado potencial de digestão (Karlsson et al., 2014).

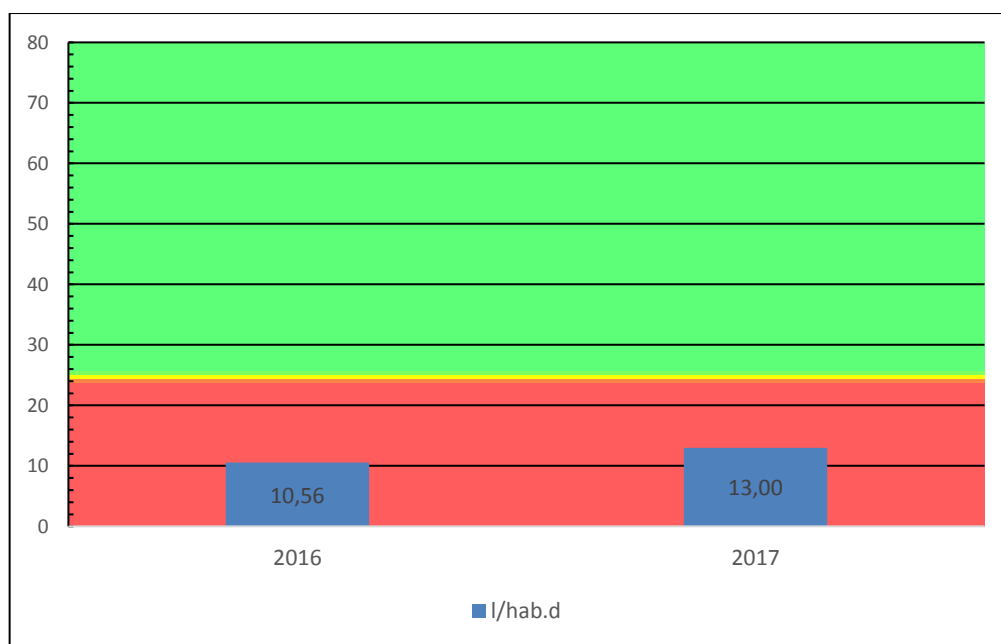


Figura 16 – Quantidade de biogás produzido por habitante equivalente.

4. Produção de biogás por massa orgânica seca:

As cargas de matéria volátil enviadas para o digestor foram de 3,53 t/dia para 2016 e 3,03 t/dia em 2017. Calculando o caudal de biogás em relação à carga volátil, o indicador do biogás por massa orgânica seca correspondeu a 323,01 l/kg para 2016 e 413,76 l/kg para 2017 (Figura 17). Estando sempre abaixo de 460 l/kg, o que corresponde ao nível

médio da curva de frequências da norma DWA-A 216E para este indicador, fica assim claro que existe um potencial de melhoria, a ser endereçado na análise energética, visto a norma indicar que há potencial de melhoria se se encontrar abaixo desse nível (zona vermelha no gráfico).

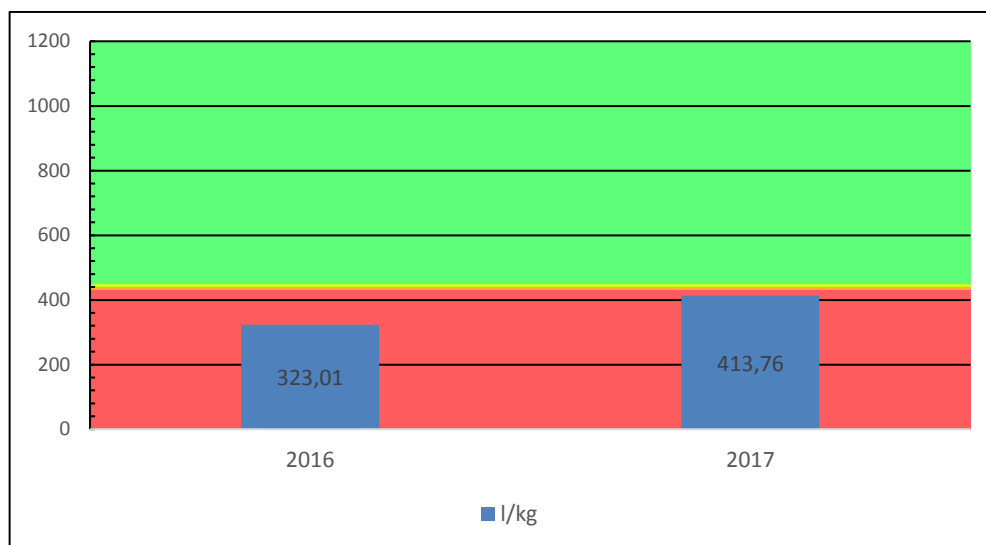


Figura 17 – Comparação da produção de biogás em relação a massa orgânica seca

5. Taxa de conversão de biogás em eletricidade:

As produções de energia elétrica da ETAR de Espinho para 2015, 2016 e 2017, foram de 1 096,7 MWh/ano, 912,36 MWh/ano e 910,75 MWh/ano, respetivamente, como se pode ver na Tabela 4, juntamente com os caudais de biogás para os respetivos anos.

Tabela 4 – Resultados da produção energética e caudais diários de biogás dos anos 2015, 2016 e 2017.

Dados	2015	2016	2017
Produção (MWh/ano)	1096,7	912,36	910,75
Caudal de biogás (dam ³ /dia)	1,37	1,14	1,26

Com base nos dados acima e utilizando uma proporção de metano de 64%, a taxa de conversão do biogás em eletricidade resultou em 12,6% para 2015 e 2016, e 11,33% para 2017 (Figura 18). Estando sempre abaixo do recomendável (percentil 50) pela curva de frequências da norma DWA-A 216E (zona vermelha no gráfico abaixo de 26,5%), este indicador demonstra claramente que há uma possibilidade de otimização e que o sistema de cogeração deve ser objeto de uma análise energética. Para melhorar

este quadro, seria recomendável que o sistema de purificação do biogás fosse verificado e o sistema de cogeração otimizado.

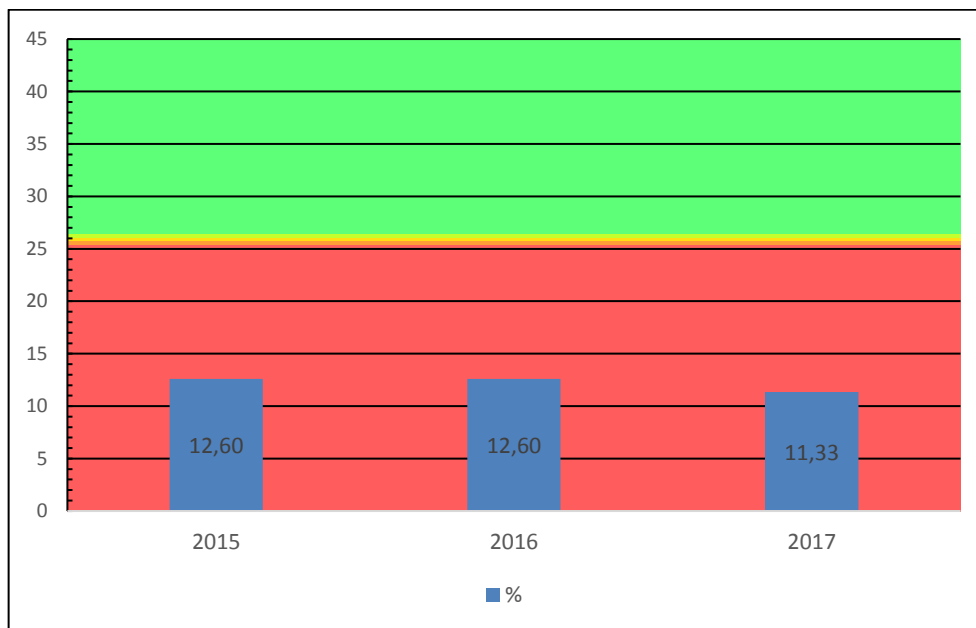


Figura 18 – Comparação da taxa de conversão de biogás em eletricidade

6. Taxa de autossuficiência energética

Com base nos valores de consumo e produção de energia (Tabela 3 e Tabela 4), os resultados deste indicador apontam para 40,78% de autossuficiência para 2015, 31,86% para 2016 e 34,19% para 2017 (Figura 19).

A norma recomenda que se se estiver abaixo do percentil 50 da curva de frequências (zona vermelha no gráfico, abaixo de 44%), existe uma potencial melhoria da autossuficiência energética e que se deve prosseguir para a análise energética. Além disso, segundo o projeto base, o sistema de cogeração foi concebido de forma a suprir 70% das necessidades energéticas da ETAR. Seria assim recomendável uma revisão do funcionamento do sistema de cogeração.

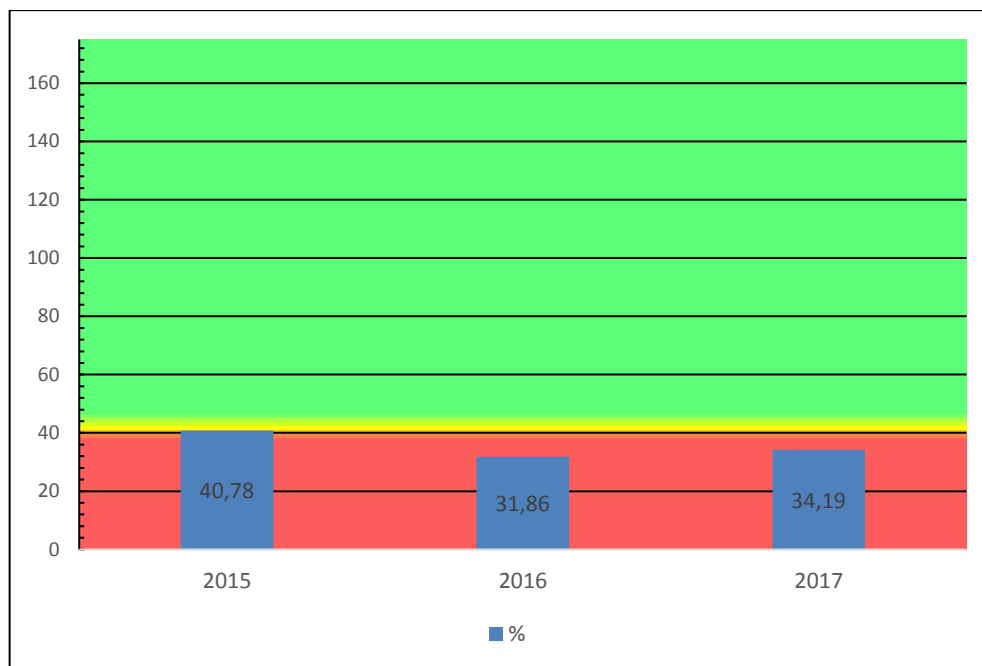


Figura 19 – Comparação das taxas de autossuficiência energética ao longo dos anos.

7. Consumo específico de bombas

As alturas manométricas, os caudais e os consumos das elevatórias iniciais, finais e de recirculação obtidos, por período em estudo, podem ser observados na Tabela 5 e na Figura 20 (apenas as elevatórias iniciais e finais). Por serem de natureza estrutural, as alturas manométrica são inalteráveis ao longo do tempo. Já os consumos e os caudais das elevatórias iniciais e finais sofreram um aumento entre 2015 e 2016 e uma redução entre 2016 e 2017. Apenas o caudal bombeado pela elevatória final manteve um ligeiro aumento entre 2016 e 2017. Pode-se assim notar que houve uma racionalização do consumo de energia, por parte das bombas finais, no ano de 2017.

Tabela 5 – Resultados das estações elevatórias iniciais, finais e recirculação para 2015, 2016 e 2017. (s.d. significa “sem dados”).

Período	Dados	Est. inicial	Recirculação	Est. Final
Todos	Altura manométrica. (m)	5,38	12,6	6,53
2015	Caudais (hm ³ /a)	6,08	s.d.	5,4
	Consumos (MWh/ano)	153,3	s.d.	221,9
2016	Caudais (hm ³ /a)	8,42	s.d.	6,02
	Consumos (MWh/ano)	500,53	s.d.	298,82
2017	Caudais (hm ³ /a)	6,88	5,91	6,07
	Consumos (MWh/ano)	436,51	207,97	232,37

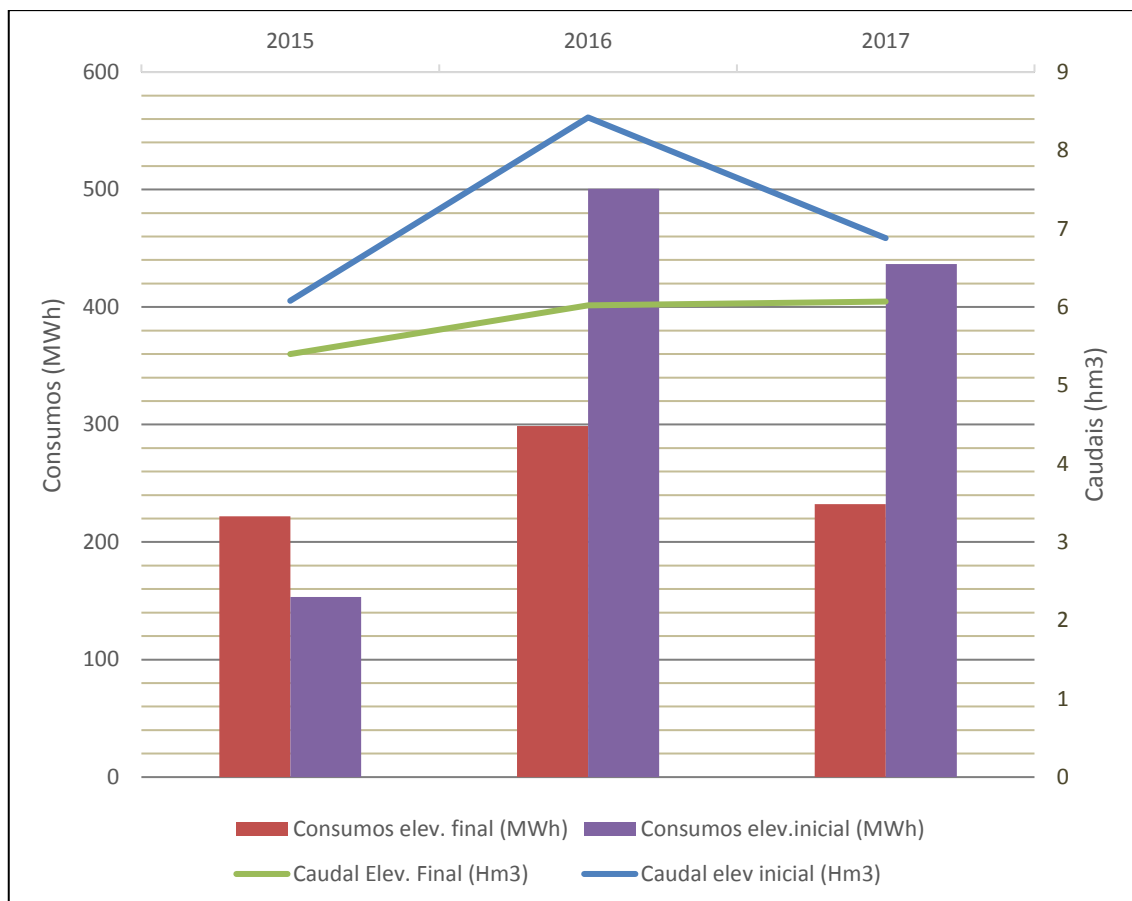


Figura 20 – Consumos e caudais das elevatórias iniciais e finais da ETAR de Espinho.

7.1 Bombas elevatórias iniciais

Com base nos dados obtidos, a estação elevatória inicial apresentou consumos na ordem de 4,68 Wh/m³.m para 2015, 11,04 Wh/m³.m para 2016 e 11,78 Wh/m³.m para 2017 (Figura 21). A norma DWA-A 216E recomenda que se os consumos estiverem acima do percentil 50 (zona vermelha no gráfico, acima de 6,75 Wh/m³.m) existe um grande potencial de melhoria e o sistema deve ser objeto de uma análise energética, que é o caso.

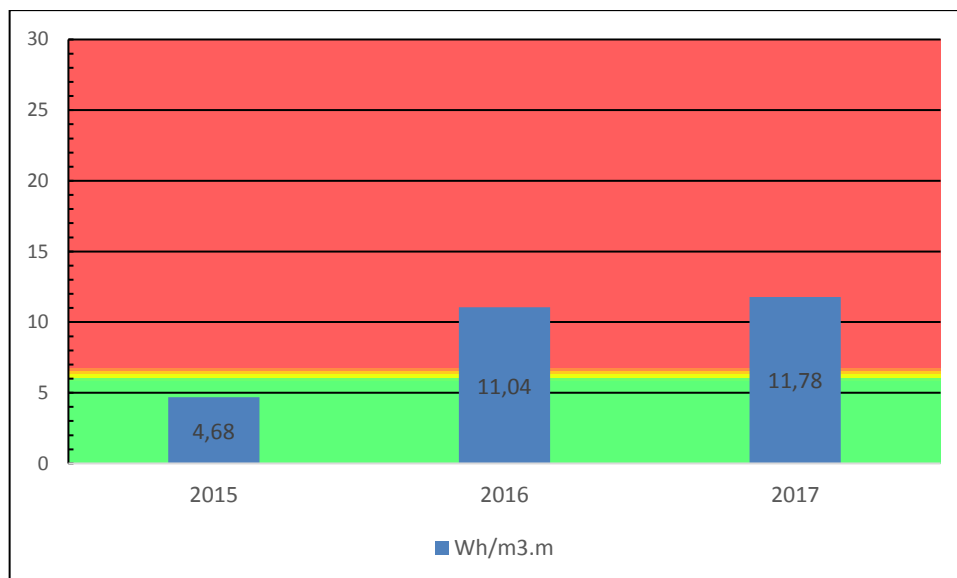


Figura 21 – Consumos específicos das estações elevatórias iniciais.

A julgar pela tendência do aumento do consumo específico ao longo do tempo, as bombas poderão começar a apresentar sinais de desgaste e, por isso, seria recomendável a revisão dos mecanismos das bombas e procurar melhorar a sua eficiência.

7.2 Bombas de recirculação

Quanto às bombas de recirculação, apenas foi possível obter os consumos relativos ao ano de 2017. Embora se tenha obtido um “bom desempenho²” total do sistema (6,34 kWh/m³.m) em relação ao percentil 50 da norma DWA-A 216E (6,75 kWh/m³.m), é importante notar que os resultados mostram um muito bom desempenho para a recirculação dos decantadores 3 e 4, mas muito mau desempenho para o decantador 2 (Figura 22), o que por si só denota a necessidade de se realizar uma análise energética para se averiguar as causas e oportunidades de melhoria pela grande disparidade entre valores, embora existam algumas diferenças estruturais entre as bombas elevatórias. Os dados indicam que o decantador 1 esteve praticamente parado a maior parte do tempo e a sua inclusão nos cálculos incorreriam num deslocamento para melhor desempenho do sistema, pelo que se decidiu omiti-lo.

² A norma DWA-A 216E indica que se o desempenho estiver acima do percentil 50 existe uma oportunidade de melhoria e deve ser objeto de análise energética, mas caso esteja abaixo, assume-se que possui um bom desempenho.

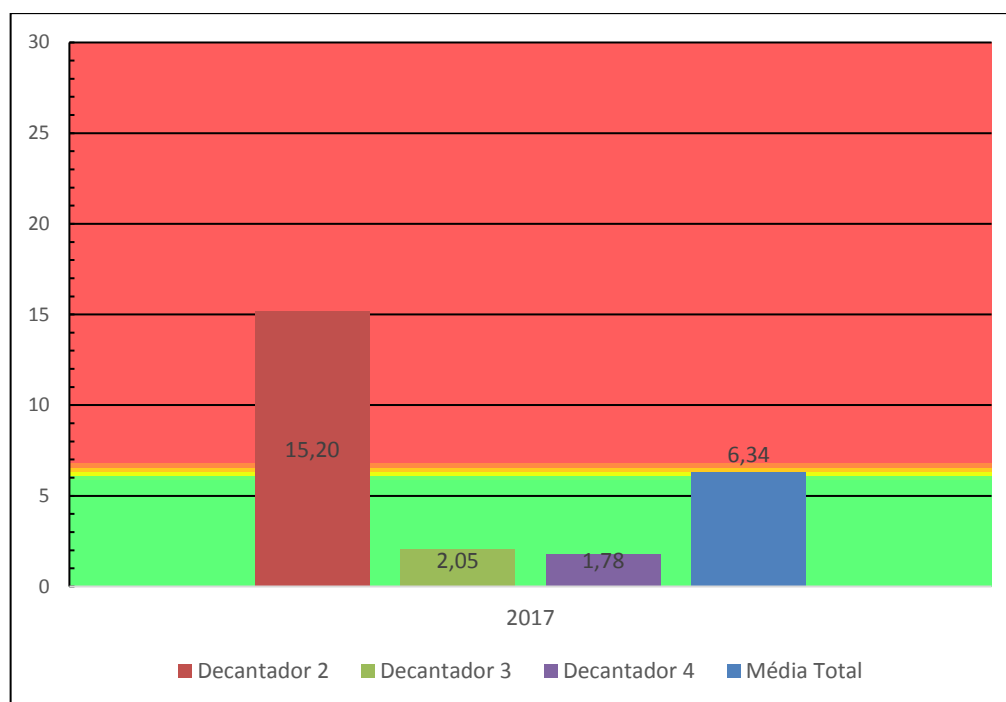


Figura 22 – Consumos específicos das estações elevatórias de recirculação de lamas (Wh/m³.m).

7.3 Bombas elevatórias finais

As bombas elevatórias finais apresentaram valores de 6,29 Wh/m³.m para 2015, 7,59 Wh/m³.m para 2016 e 5,86 Wh/m³.m para 2017. Segundo a recomendação da norma DWA-A 216E (o consumo estar abaixo de 6,75 Wh/m³.m, que corresponde a zona verde no gráfico e, logo, não ser necessária a execução de uma análise energética) para os anos de 2015 e 2017 os valores mostram-se eficientes, tendo apenas tido valores preocupantes em 2016 (Figura 23). Uma vez que os resultados mais recentes (2017) não estão acima do limiar indicado pela norma, não se tem por necessária a abrangência desta unidade pela análise energética, pese embora poder-se-á executá-la se se pretender melhorar ainda mais.

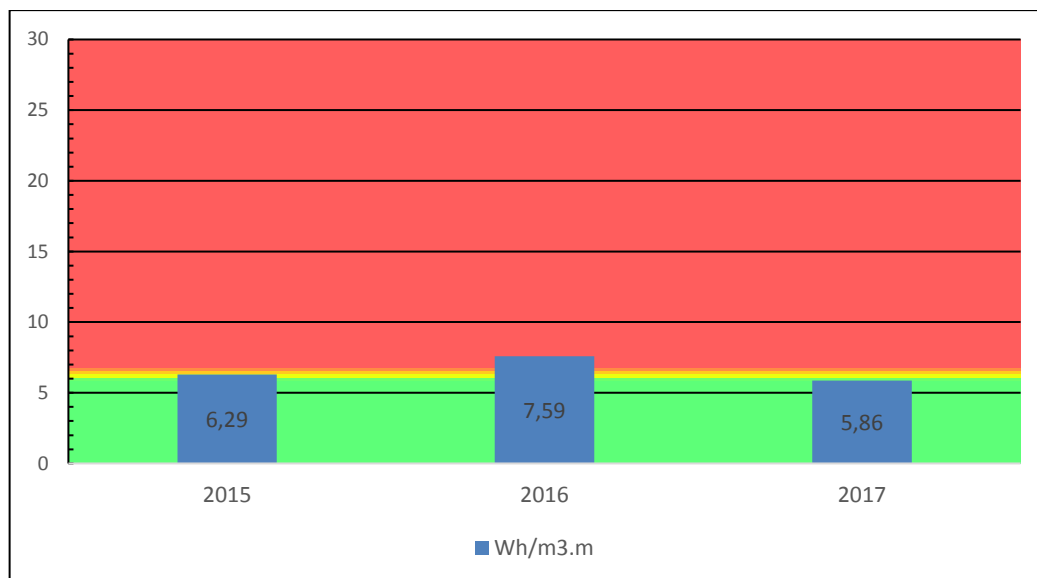


Figura 23 – Consumos específicos das estações elevatórias finais.

8. Consumo de calor externo específico

Já desde antes de 2015 que o sistema de cogeração e a caldeira não utilizam nenhum tipo de combustível externo para o aquecimento das lamas, o que se traduz numa boa condição de funcionamento para este indicador (consumo externo de 0 kWh/hab.ano).

Com base nestes resultados, pode-se resumir que o sistema de tratamento da ETAR de Espinho apresenta oportunidades de melhoria na digestão anaeróbia (possibilidade de se gerar mais biogás), no sistema de cogeração (melhorar a eficiência dos cogeradores e a pureza do biogás) e na estação elevatória inicial, tornando-as imediatamente objeto de uma análise energética mais aprofundada. Revela-se ainda necessária uma análise mais detalhada do sistema de arejamento e de recirculação de lamas.

3.2.1 Fatores críticos dos indicadores de desempenho

Os diferentes indicadores de desempenho utilizados são relações matemáticas entre diferentes parâmetros de funcionamento da ETAR. Da análise aos resultados deste trabalho, pode concluir-se que para influenciar os indicadores de desempenho é necessário intervir nos seguintes aspetos:

1. **Consumo específico da ETAR:** é influenciado pelos consumos de todos os equipamentos e pelas cargas orgânicas que chegam a ETAR. Dá uma indicação do estado geral da ETAR e para o alterar, é preciso determinar quais os principais consumidores e agir sobre a eficiência desses, uma vez que as cargas não são passíveis de controlo.
2. **Consumo específico dos arejadores:** é constituído pelos consumos dos arejadores e pelas cargas orgânicas. Pela impossibilidade de influenciar as cargas, pode agir-se sobre o consumo, isto é, o tempo de funcionamento (cumprindo as exigências do tratamento), o estado de conservação e melhoramento da eficiência (manutenção, substituição de componentes, etc.)
3. **Produção de biogás por habitante:** depende do caudal de biogás produzido e das cargas orgânicas. Não sendo possível alterar as cargas, pode agir-se nas condições que permitem uma melhor produção de biogás pelos microrganismos, isto é, as condições de mistura e escoamento, a existência de fatores limitantes (balanço e disponibilidade de nutrientes, biomassa ativa, existência de inibidores ou nível de desidratação da lama) e adição de substratos.
4. **Produção de biogás por massa orgânica seca:** semelhante ao indicador 3.
5. **Taxa de conversão de biogás em eletricidade:** depende do caudal de biogás e da energia produzida. Pode atuar-se nos fatores condicionantes da produção de biogás (indicador 3), incluindo o funcionamento do sistema de purificação de biogás, e das condições de operação do sistema de cogeração (estado de conservação, manutenção e eficiência dos mecanismos).
6. **Grau de autossuficiência energética:** depende da energia consumida e da produzida. Pode atuar-se na eficiência do consumo de todos os equipamentos e na melhoria da operação do sistema de produção (manutenções, substituição de componentes, melhoria da eficiência e purificação do biogás).
7. **Consumo específico de bombas:** Depende do consumo da bomba, do caudal e da altura de elevação. Como não se pode alterar a estrutura de funcionamento, não é possível alterar a altura. O caudal é variável e dependente de fatores externos. Todavia, pode agir-se no consumo nominal com manutenções, substituição de componentes e melhoramento da eficiência dos mecanismos.

- 8. Consumo externo específico:** depende do consumo e das cargas orgânicas. Como não é possível alterar as cargas, pode apenas melhorar-se os sistemas de aquecimento de lamas (ter as caldeiras ou sistemas de cogeração mantidos em bom estado de funcionamento) para não ser necessária a utilização de combustível externo.

3.3 Análise energética

3.3.1 Determinação da situação atual e matriz de consumos

Da inspeção feita ao funcionamento atual da ETAR, observou-se que nem todos os sistemas estão em funcionamento (principalmente por razões de avaria), nomeadamente: (1) apenas duas linhas de arejamento estavam a ser utilizadas, quando deviam estar as três (estando a porção inativa do reator biológico a ser usada para armazenar lamas); (2) o sistema de cogeração estava em reparação; (3) apenas uma centrífuga estava a funcionar, quando deviam estar pelo menos duas; (4) apenas um compressor para a mistura do digestor estava a funcionar, quando devias estar dois no mínimo; e (5) dos quatro decantadores secundários existentes, um não estava em funcionamento e, por consequência, nem o seu sistema de recirculação.

Dado que a ETAR não estava a funcionar na sua totalidade e por estar prevista para breve a execução de intervenções de beneficiação da instalação, optou-se por não executar a análise energética sob pena de se produzirem resultados desatualizados em face da realidade da ETAR pós intervenção. Contudo, resultou desta etapa a lista de grupos e matriz de consumos constante no apêndice D.

3.3.2 Valores de referência da ETAR de Espinho

Foram gerados alguns valores de referência específicos para alguns dos principais grupos, como se pode ver na Tabela 6 (excerto da lista de grupos da ETAR). No horizonte de projeto 2020 da ETAR de Espinho, o caudal médio anual que as estações elevatórias iniciais e finais teriam de bombear é de aproximadamente 10 322 200 m³/ano. Tendo em conta um consumo específico de 4,7 Wh/m³.m (recomendação da norma) para a elevatória inicial, resultou num consumo anual da estação de 261 MWh/ano. Já para a elevatória final, considerando um consumo específico de 4,2 Wh/m³.m, resultou num consumo anual de 283,09 MWh/ano. Quanto as elevatórias de recirculação, assumindo um consumo específico de 4,7 Wh/m³.m, as elevatórias dos decantadores pequenos (bombear 1/6 do caudal total a uma razão

de recirculação de 0,7) representariam um consumo entre 65,77 a 70 MWh/ ano cada, enquanto as elevatórias dos decantadores grandes (bombeando 1/3 do caudal global a uma razão de recirculação de 0,7) representariam um consumo de 149,31 MWh/ano. Assim, o consumo total do sistema de recirculação seria de 434,86 MWh/ano. Já no caso dos arejadores, considerando uma taxa de transferência de oxigênio de 117 kg/h, uma eficiência de arejamento de 2 kg/kWh e que o sistema dos 9 arejadores funciona 26 710 h/ano (aproximadamente 8 horas por dia para cada arejador), o consumo seria de 1,56 GWh/ano. Se se considerasse que apenas 6 dos arejadores estivessem a funcionar com esse número de horas (correspondendo a 12 horas diárias de funcionamento por ano), obter-se-ia o mesmo valor energia consumida, porém comparando com o valor obtido na medição energética (995,39 MWh), os arejadores têm funcionado de forma eficiente.

Tabela 6 – Valores de referência de algumas unidades da ETAR de Espinho (Excerto da lista de grupos).

Descrição	Código	Fatores de cálculo			Resultados
		Caudal (m³)	Altura manométrica (m)	Consumo específico (Wh/m³.m)	Energia MWh/ano
Estação elevatória inicial		10 322 200	5,38	4,70	261
Parafuso de Arquimedes 1	P1111				
Parafuso de Arquimedes 2	P1112				
Parafuso de Arquimedes 3	P1113				
		SOTR (kg/h)	Horas de funcionamento (h/ano)	SAE (kg/kWh)	Energia (MWh/ano)
Tratamento biológico		117	26 710	2,00	1 562,5
Arejador 1	A3111				
Arejador 2	A3112				
Arejador 3	A3113				
Arejador 4	A3121				
Arejador 5	A3122				
Arejador 6	A3123				
Arejador 7	A3131				
Arejador 8	A3132				
Arejador 9	A3133				
Sistema de recirculação	1	Caudal (m³/a)	Altura manométrica (m)	Consumo específico (Wh/m³.m)	Energia MWh/ano
Bomba de recirculação de lamas 1	P4211	1 204 256	12,37	4,70	70
Bomba de recirculação de lamas 2	P4212				
	2				
Bomba de recirculação de lamas 3	P4221	2 408 513	13,23	4,70	149,76
Bomba de recirculação de lamas 4	P4222				
	3				
Bomba de recirculação de lamas 5	P4231	1 204 256	11,62	4,70	65,77

Descrição	Código	Fatores de cálculo			Resultados
		Caudal (m³)	Altura manométrica (m)	Consumo específico (Wh/m³.m)	Energia MWh/ano
Bomba de recirculação de lamas 6	P4232				
	4				
Bomba de recirculação de lamas 7	P4241	2 408 513	13,19	4,70	149,3
Bomba de recirculação de lamas 8	P4242				
				SOMA:	434,86
		Caudal (m³/a)	Altura manométrica (m)	Consumo específico (Wh/m³.m)	Energia MWh/ano
Elevação final da AR		10 322 200	6,53	4,20	283,09
Bomba elevatória final 1	P5211				
Bomba elevatória final 2	P5212				
Bomba elevatória final 3	P5213				
Bomba elevatória final 4	P5214				

É interessante notar que, a título de exemplo, se se comparar os valores de referência encontrados com os consumos dos grupos calculados durante a medição energética (apenas para o ano de 2017), encontram-se grandes diferenças para com o *benchmarking* da norma DWA-A 216E. Como se pode ver na Tabela 7, para o mesmo caudal (caudal bombeado de 2017), o consumo anual da elevatória inicial apresentou uma ineficiência de 184%, o que demonstra o quão distante se pode estar do nível de eficiência proposto pela norma.

Tabela 7 – Matriz de comparação dos valores de referência e dos valores históricos (de 2017) do sistema elevatório inicial da ETAR de Espinho.

Descrição	Dados	Caudal (hm³/a)	Consumos (MWh)	Eficiência (%) = (Ref-Hist)/Ref
Estação elevatória inicial	Referência (DWA-A 216E)	6,084	153,85	-184%
	2017	6,084	436,52	

É importante notar que a análise feita nesta secção, isto é, a comparação de valores de referência com os resultados da medição, é alheia aos procedimentos da norma (e à metodologia proposta), servindo apenas para se observar de forma indicativa o desvio dos resultados históricos obtidos em relação aos consumos de referência propostos pela norma DWA-A 216E.

4. Conclusões

No presente trabalho foi desenvolvida uma metodologia de auditoria energética de uma ETAR, com base nas melhores práticas normativas, estado da arte e legislação vigente. Ao mesmo tempo que se desenvolveu o método, foi testada a sua implementação numa ETAR em contexto português e retiradas as seguintes conclusões.

A metodologia desenvolvida mostrou-se aplicável, resultando em medidas de melhoria, nomeadamente, a necessidade de melhor agitação e escoamento do sistema de digestão anaeróbia (por exemplo), de revisão da cogeração e das elevatórias iniciais, que são de todo úteis para outros desenvolvimentos da própria auditoria e também para a gestão e operação da ETAR. Todavia, salienta-se a necessidade de realizar todo o procedimento de auditoria planeado, culminando com a elaboração do relatório de auditoria contendo a totalidade das medidas e respetiva avaliação económica. Espera-se poder realizar este trabalho numa oportunidade futura, em que a ETAR esteja totalmente operacional.

De modo a tornar a metodologia mais prática e facilitar trabalhos futuros, recomenda-se a instalação de um sistema de monitorização remoto, acoplado a um sistema de gestão técnico de energia, que permita a recolha automática dos dados e a determinação célere dos diferentes indicadores de desempenho, através de uma plataforma fácil de utilizar, com formas de visualização interativas, facilmente interpretáveis para períodos escolhidos pelo utilizador. É também recomendável a garantia de funcionamento dos sistemas de gestão e disponibilização de informação, em particular a calibração dos sensores e medidores encontrados nos grupos de equipamentos e a garantia de perfeitas condições de funcionamento do sistema de aquisição, controle e processamento de dados da ETAR (SCADA).

Recomenda-se também a incorporação dos procedimentos do Protocolo Internacional de Medição e Verificação de modo a normalizar os possíveis desvios nos resultados decorrentes de fatores de influência rotineira (de normal alteração ao longo do tempo, como o clima) ou não rotineira (fatores que não se espera alteração ao longo do tempo, como possíveis alterações nas estruturas, *design* operacional, dimensionamento, etc.).

Por outro lado, é importante notar que o trabalho realizado incorporou alguns dados assumidos (em particular alguns dados de consumos), pelo que se recomenda, em trabalhos futuros, a aplicação de metodologias para tratamento de incertezas para reduzir a imprecisão dos resultados.

A legislação vigente em Portugal obriga à avaliação do desempenho das ETAR e à posterior elaboração de planos de racionalização de energia para a prossecução da eficiência energética, dando liberdade à entidade gestora de determinar a forma como faz esse levantamento e como elabora o plano de racionalização, especificando, contudo, algumas obrigаторiedades relativas a metas e indicadores energéticos (intensidade energética e carbónica).

A norma DWA-A 216E mostrou-se bastante pertinente e adequada, endereçando as questões mais importantes a nível do desempenho de uma ETAR, nas diferentes fases que compõem o processo de tratamento, servindo para colmatar as exigências impostas pela legislação em matéria de auditoria ao desempenho energético e apoio na elaboração dos planos de racionalização do consumo de energia. Esta norma demonstrou-se acessível e abrangente, exigindo a aquisição de muita informação sobre o objeto da auditoria e um conhecimento profundo dos mecanismos de funcionamento das ETAR e de energia, e as suas relações no cômputo “eficiência de tratamento/consumo energético”.

Contudo, uma ETAR não está preparada para a utilização da norma DWA-A 216E quando não está a funcionar em pleno e quando é particularmente difícil obter algumas informações exigidas pela norma, isto é, caso não tenha todos os equipamentos em funcionamento e não esteja a funcionar, em todas as fases do tratamento, com o número de equipamentos a que foi concebida; e quando há dificuldade em se obterem os registos históricos de desempenho da ETAR, bem como que o sistema de supervisão e monitorização apresentar erros no processamento da informação, o que, por consequência, levanta dúvidas sobre a validade dos dados. Torna-se assim necessário, para a implementação da norma DWA-A 216E, a implementação de sistemas adicionais de medição de consumos dos principais equipamentos que são objeto dos indicadores (para os que não tiverem já sido contemplados no sistema de monitorização aquando da conceção). Por outro lado, aquando da realização de auditorias energéticas, é necessária a existência de um número significativo de equipamentos de medição a funcionar em simultâneo, o que torna este processo exigente do ponto de vista de recursos necessários.

Com base no trabalho feito, pode concluir-se que para se otimizar a gestão de energia em ETAR, é preciso:

- (1) A obtenção de dados fiáveis e credíveis sobre o desempenho da ETAR;
- (2) O conhecimento dos procedimentos para a obtenção de indicadores de desempenho adequados e o estabelecimento de valores de referência e metas;

- (3) Entender quais os fatores determinantes de cada indicador e como influenciá-los sem comprometer a capacidade de se garantir a qualidade desejada no efluente final;
- (4) Agir em conformidade sobre as condicionantes dos indicadores;
- (5) Monitorizar os indicadores de forma contínua.

A eficiência energética nas ETAR, especialmente nas mais antigas, torna-se bastante importante porque permite identificar os aspetos de funcionamento a otimizar, permitindo uma perceção atempada e uma intervenção eficaz sobre os equipamentos que se encontram em sobrecarga e desgaste mais acelerado, promovendo assim a longevidade dos sistemas pela implementação de práticas que evitem a sua sobrecarga.

Por último, a execução deste tipo de trabalho fica ainda facilitada pelo facto de a entidade proprietária da ETAR ter um grande interesse na realização de auditorias energéticas, no cumprimento da legislação vigente em matéria de energia e na prossecução da eficiência energética nas suas instalações, ainda mais quando possui um Sistema de Gestão de Energia (SGE) implementado.

REFERÊNCIAS

- Adelphi. (14 de Maio de 2018). *Guidelines for energy management systems*. Obtido de Adelphi: <https://www.adelphi.de/en/project/guidelines-energy-management-systems>
- Antonie, R. L. (2017). *Fixed Biological Surfaces - Wastewater Treatment - The Rotating Biological Contactor*. CRC Press.
- Appels, L., Lauwers, J., Degreëve, J., Helsen, L., Lievens, B., Willems, K., . . . Dewil, R. (29 de Setembro de 2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 4295-4301.
- Banco Mundial. (18 de Junho de 2018). *Population, total*. Obtido de The World Bank: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>
- CE, COM (2011) 109 final. (8 de Março de 2011). *COMUNICAÇÃO DA COMISSÃO AO PARLAMENTO EUROPEU, AO CONSELHO, AO COMITÉ ECONÓMICO E SOCIAL EUROPEU E AO COMITÉ DAS REGIÕES*. Bruxelas: Comissão Europeia.
- Comissão Europeia. (9 de Agosto de 2018). *2030 Energy Strategy*. Obtido de European Commission: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy>
- CONSULAQUA Hamburg Beratungsgesellschaft mbH; Ercolano, L.; Laenge, H.; Darmstadt, iat; Haberkern, B. (2015). *Guidelines on Energy Efficiency for Water and Wastewater Utilities*. Jordan: The Arab Countries Water Utilities Assossiation (ACWUA) under the guidance of the ACWUA Task Force Energy Efficiency with support from the Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- de Haas, D. W. (13 de Abril de 2016). Wastewater treatment energy efficiency. *ResearchGate*.
- Decreto-Lei n.º 29/2011. (28 de Fevereiro de 2011). Estabelece o regime jurídico aplicável à formação e execução dos contratos de desempenho energético que revistam a natureza de contratos de gestão de eficiência energética. *Diário da República*, 1.ª série — N.º 41, pp. 1209-1216.

- Decreto-Lei n.º 319/2009. (3 de Novembro de 2009). Transpõe para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2006/32/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril, relativa à eficiência na utilização final de energia e aos serviços energéticos. *Diário da República*, 1.ª série — N.º 213, pp. 8320-8329.
- Decreto-Lei n.º 58/82. (26 de Fevereiro de 1982). Estabelece o regime jurídico das instalações consumidoras intensivas de energia. *Diário da República*, I Série - N.º 47, pp. 423-424.
- Decreto-Lei n.º 68-A/2015. (30 de Abril de 2015). Estabelece disposições em matéria de eficiência energética e produção em cogeração, transpondo a Diretiva n.º 2012/27/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de outubro de 2012, relativa à eficiência energética. *Diário da República*, 1º Série - N.º 84, pp. 2206-(2)-2206-(52).
- Decreto-Lei n.º 71/2008. (15 de Abril de 2008). Regula o sistema de gestão dos consumos intensivos de energia. *Diário da República*, 1.ª série — N.º 74, pp. 2222-2226.
- Despacho n.º 17313/2008. (26 de Junho de 2008). Publicação dos fatores de conversão para tonelada equivalente petróleo (tep) e dos fatores para cálculo da Intensidade Carbónica pela emissão de gases com efeito de estufa, referidos a quilograma de CO2 equivalente. *Diário da República*, 2.ª série — N.º 122, pp. 27912-27913.
- Despacho n.º 17449/2008. (27 de Junho de 2008). Elementos a considerar na realização de auditorias energéticas, na elaboração dos planos de racionalização do consumo de energia (PREn) e nos relatórios de execução e progresso (REP). *Diário da República*, 2º Série - N.º 123, pp. 28093-28094.
- DWA-A 216E. (2015). *Energy Check and Energy Analysis - Instruments to Optimise the Energy Usage of Wastewater Systems*. Germany: German Association for Water, Wastewater and Waste.
- EDP Distribuição. (18 de Junho de 2018). *Total Nacional*. Obtido de EDP Distribuição: <http://www.edp-distribuicao.com/dados-energia/#>
- ENERWATER. (2015). *Deliverable 2.1 Study of published energy data*. H2020-EE-2014-3-MarketUptake.

- ERSAR. (18 de Junho de 2018). *Entidade Reguladora de Serviços de Água e Resíduos*. Obtido de Dados de Base, Relatórios e dados de base 2011-2016: <http://www.ersar.pt/pt/setor/factos-e-numeros/dados-de-base>
- Fawkes, S. (06 de Julho de 2018). *A brief history of energy efficiency*. Obtido de Only Eleven Percent: <https://www.onlyelevenpercent.com/a-brief-history-of-energy-efficiency/>
- Ferreira, M. I. (2013). *SISTEMAS PREDIAIS DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS DOMÉSTICAS*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Foladori, P., Vaccari, M., & Vitali, F. (2015). Energy audit in small wastewater treatment plants: methodology, energy consumption indicators, and lessons learned. *Water Sci Technol*. 2015, 72(6):1007-1015. doi: 10.2166/wst.2015.306.
- FprEN 16247-1. (2012). *Energy audits - Part 1: General requirements*. Bruxelas: CEN/CENELEC.
- Gerek, E. E., Yilmaz, S., Koparal, A. S., & Gerek, O. N. (2017). Combined energy and removal efficiency of electrochemical wastewater treatment for leather industry. *Journal of Water Process Engineering*, p. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.03.007>.
- Gómez, T., Gémar, G., Molinos-Senante, M., Sala-Garrido, R., & Caballero, R. (23 de Junho de 2017). Assessing the efficiency of wastewater treatment plants: A doublebootstrap approach. *Journal of Cleaner Production*, pp. 315-324.
- Gramlich, E., Schröder, M., Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft, & Members of DWA and German Water Partnership. (2014). *Guidelines for Energy Checks and Energy Analysis in Water and Wastewater Utilities*. Marocco: Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft.
- Grissop, G. (1 de Dezembro de 2010). BIOLOGICAL NUTRIENT REMOVAL PROCESS. *Shenandoah Valley Pure H2O Forum*. CDM. Obtido de acsawater.
- Guerrini, A., Romano, G., & Indipendenza, A. (27 de Junho de 2017). Energy Efficiency Drivers in Wastewater Treatment Plants: A Double Bootstrap DEA Analysis. *Sustainability*.
- Hernandez-Sancho, F., Molinos-Senante, M., & Sala-Garrido, R. (6 de Maio de 2011). Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non-radial DEA approach. *Science of the Total Environment*, pp. 2693–2699.

- IPMVP®. (2016). *Core Concepts, International Performance Measurement and Verification Protocol*. Efficiency Valuation Organization.
- Judd, S. (2006). *The MBR Book Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Oxford: Elsevier.
- Karlsson, A., Björn, A., Yekta, S. S., & Svensson, B. H. (2014). *IMPROVEMENT OF THE BIOGAS PRODUCTION PROCESS Explorative project (EP1)*. Linköping: Linköping University.
- Lu, B., Du, X., & Huang, S. (21 de Outubro de 2016). The economic and environmental implications of wastewater management policy in China: From the LCA perspective. *Journal of Cleaner Production*, pp. 3544-3557.
- Monte, H. M., Santos, M. T., Barreiros, A. M., & Albuquerque, A. (2016). *TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS, OPERAÇÕES E PROCESSOS DE TRATAMENTO FÍSICO E QUÍMICO*. Lisboa: ERSAR, ISEL.
- Mustapha, M. A., Manan, Z. A., & Alwi, S. R. (20 de Agosto de 2017). A new quantitative overall environmental performance indicator for a wastewater treatment plant. *Journal of Cleaner Production*, pp. 815-823.
- NP EN ISO 50001:2012. (2012). *Sistemas de Gestão de Energia, Requisitos e linhas de orientação para a sua utilização (ISO 50001:2011)*. Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- NP ISO 50002:2017. (2017). *Auditorias Energéticas - Requisitos com orientação para o seu uso*. Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- Qasim, S. R. (1998). *Wastewater Treatment Plants - Planning, Design and Operation* (2ª Edição ed.). Routledge: CRC Press.
- Silva, D. A. (2016). *Análise dos consumos energéticos nas ETAR. Casos de estudo: ETAR do Seixal e Sesimbra*. Lisboa: Faculdade de ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- SIMRIA. (2011). *Auditoria Energética, Estação de Tratamento de Águas Residuais de Espinho (ETAR Espinho)*. Aveiro: SIMRIA.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stansel, H. D. (2006). Wastewater Engineering: An Overview. Em M. a. Eddy, *Wastewater Engineering. Tratment and Reuse* (pp. 1-24). Nova York, Estados Unidos da América: McGraw Hill Companies.

- Tecnia Engenharia. (30 de Junho de 2018). *Eficiência Energética*. Obtido de Tecnia Engenharia: <http://www.tecniingenharia.com/efici-ncia-energ-tica.html>
- Tong, T., & Elimelech, M. (8 de Junho de 2016). The Global Rise of Zero Liquid Discharge for Wastewater Management: Drivers, Technologies, and Future Directions. *Environmental Science & Technology*, pp. 6846-6855.
- Toprak. (18 de Junho de 2018). *Wastewater Treatment...* Obtido de Toprak Home Page: <http://web.deu.edu.tr/atiksu/ana52/summary3.html>
- U.S. EPA. (2013). *Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities*. Local government climate and energy strategy guides: United States Environmental Protection Agency.
- Vasco-Correa, J., Khanal, S., Manandhar, A., & Shah, A. (Janeiro de 2018). Anaerobic digestion for bioenergy production: Global status, environmental and techno-economic implications, and government policies. *Bioresource Technology*, pp. 1015-1026.
- WERF. (2010). *Energy Efficiency in Wastewater Treatment in North America: A Compendium of Best Practices and Case Studies of Novel Approaches*. Alexandria: Water Environment & Reuse Foundation, Co-published by International Water Association.
- Wikipedia. (18 de Junho de 2018). *Wikipedia, The free encyclopedia*. Obtido de Membrane bioreactor: https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane_bioreactor
- Xie, M., Shon, H. K., Gray, S. R., & Elimelech, M. (22 de Novembro de 2016). Membrane-based processes for wastewater nutrient recovery: Technology, challenges, and future direction. *Water Research*, pp. 210-221.
- Zou, S., & He, Z. (15 de Dezembro de 2017). Efficiently “pumping out” value-added resources from wastewater by bioelectrochemical systems: A review from energy perspectives. *Water Research*, pp. 62-73.

APÊNDICES

Apêndice A – Matriz legislativa

Diploma	Aplicabilidade	Artigo	Aplicação a ETAR	Artigo
Decreto-Lei n.º 68-A/2015, de 30 de Abril	"... Estabelece disposições em matéria de eficiência energética e cogeração, transpondo para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2012/27/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de outubro de 2012, relativa à eficiência energética, que altera as Diretivas n. 2009/125/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de outubro de 2009, e 2010/30/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, e revoga as Diretivas 2004/8/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de fevereiro de 2004, e 2006/32/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de abril de 2006."	1.º	1 - As empresas que não sejam PME devem ser objeto de realização de auditoria energética, independente e rentável, até 5 de dezembro de 2015, e, em seguida, pelo menos de quatro em quatro anos a contar da última, devendo para o efeito, cumprir os critérios mínimos constantes no anexo IV ao presente decreto -lei, que dele faz parte integrante.	12.º (1.)
			Ações específicas anteriormente implementadas com impacto em 2020 "1 — São contabilizadas as seguintes ações específicas..."; "d) No âmbito do Programa «Sistema de Eficiência Energética na Indústria», medidas de poupança inseridas nos Planos de Racionalização dos Consumos de Energia, submetidos, pelos consumidores intensivos de energia, à Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), até ao final de 2010, no âmbito do Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (SGCIE), aprovado pelo Decreto -Lei n.º 71/2008, de 15 de abril, alterado pela Lei n.º 7/2013, de 22 de janeiro, (medidas «17M1», «17M2», «17M3» e «17M4»)."	Anexo I (1. d))

Diploma	Aplicabilidade	Artigo	Aplicação a ETAR	Artigo
Decreto-Lei n.º 68-A/2015, de 30 de Abril	"... Estabelece disposições em matéria de eficiência energética e cogeração, transpondo para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2012/27/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de outubro de 2012, relativa à eficiência energética, que altera as Diretivas n. 2009/125/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de outubro de 2009, e 2010/30/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, e revoga as Diretivas 2004/8/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de fevereiro de 2004, e 2006/32/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de abril de 2006."	1.º	Medidas políticas destinadas a obter novas economias de energia "1 — São contabilizadas as seguintes ações específicas para efeitos do cumprimento dos objetivos..."; "g) No âmbito do «Programa Ip1 — Sistemas de Eficiência Energética na Indústria e outros setores», execução de auditorias energéticas obrigatórias, nos termos do Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (SGCIE), constante do Decreto -Lei n.º 71/2008, de 15 de abril, alterado pela Lei n.º 7/2013, de 22 de janeiro, e revisão desse mesmo regime, no sentido do alargamento do seu âmbito de aplicação e melhoria do grau de monitorização dos consumos de energia e das condições de incentivo para estimular a adesão de empresas em regime voluntário, bem como aproximação das obrigações relativas à eficiência energética constantes do Decreto -Lei n.º 34/2011, de 8 de março, alterado pelo Decreto -Lei n.º 25/2013, de 19 de fevereiro, referentes ao regime de miniprodução, de forma a que as mesmas se enquadrem no regulamento do SGCIE (medidas «Ip1m1 — SGCIE medidas transversais» e «Ip1m2 — SGCIE Medidas específicas»);	Anexo II (1.-g))
Decreto-Lei n.º 71/2008, de 15 de abril	O presente decreto -lei regula o sistema de gestão dos consumos intensivos de energia, abreviadamente designado por SGCIE, instituído com o objetivo de promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos de instalações consumidoras intensivas de energia.	1.º	1 — O regime previsto no presente decreto-lei aplica-se às instalações consumidoras intensivas de energia (CIE) que no ano civil imediatamente anterior tenham tido um consumo energético superior a 500 toneladas equivalentes petróleo (500 tep/ano), com exceção das instalações de co - geração juridicamente autónomas dos respetivos consumidores de energia. ⁽³⁾ ... 4 — Sem prejuízo do disposto nos números anteriores, o regime previsto no presente decreto-lei pode ser aplicável às empresas que tendo um consumo energético inferior aos limites previstos no n.º 1 ou que se encontrem na situação referida no número anterior pretendam, de forma voluntária, celebrar acordos de racionalização de consumo de energia.	2.º (1. e 4.)

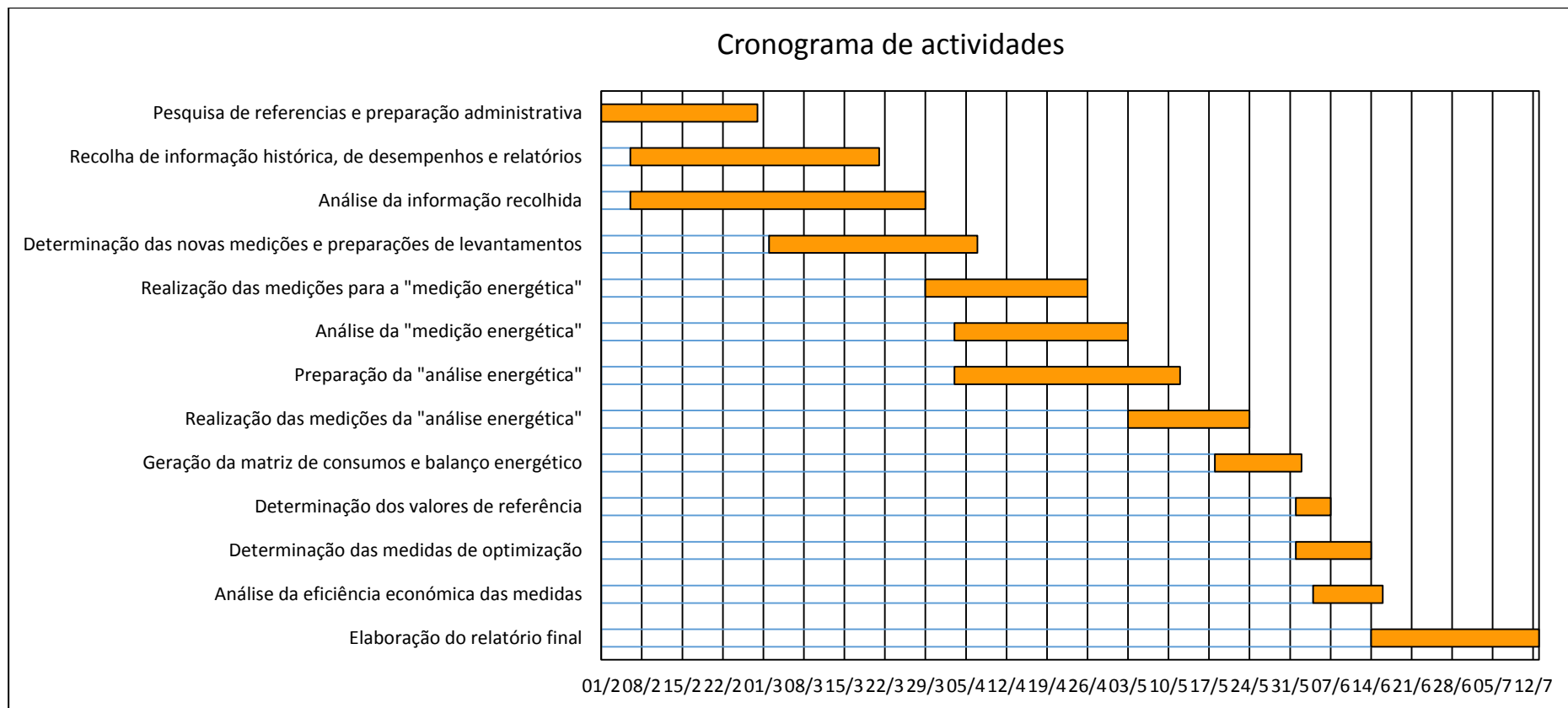
³ A determinação da abrangência ou não neste ponto é calculado de acordo com a expressão publicada no despacho n.º 17313/2008.

Diploma	Aplicabilidade	Artigo	Aplicação a ETAR	Artigo
Decreto-Lei n.º 71/2008, de 15 de abril	O presente decreto -lei regula o sistema de gestão dos consumos intensivos de energia, abreviadamente designado por SGCI, instituído com o objetivo de promover a eficiência energética e monitorizar os consumos energéticos de instalações consumidoras intensivas de energia.	1.º	2 — Com vista à aplicação do presente decreto-lei, o diretor -geral da DGEG aprova, por despacho a publicar no Diário da República, a seguinte regulamentação técnica: a) Fatores de conversão para equivalente a petróleo de teores em energia de combustíveis selecionados para utilização final; ⁽⁴⁾ b) Elementos a ter em consideração na realização de auditorias energéticas, na elaboração dos planos de racionalização energética e nos relatórios de execução e progresso; ⁽⁵⁾	19.º (a) e b))

⁴ Estes fatores foram aprovados pelo Despacho n.º 17313/2008.

⁵ Estes elementos foram publicados pelo Despacho n.º 17449/2008.

Apêndice B – Plano temporal de atividades



Apêndice C – Delimitação de unidades

Nível 1	Nível 2	Nível 3
	Processo / Unidade	Subprocesso / Subunidade
ETAR	1. Estações elevatórias e bombas	1. Elevação inicial
		2. Elevação final
		3. Recirculação de lamas
		4. Elevação de lamas primárias
		5. Elevação de lamas secundárias
		6. Elevação de lamas espessadas
		7. Elevação de lamas mistas
		8. Elevação de lamas desidratadas
		9. Extração de lamas a aquecer
		10. Injeção de polímero
		11. Injeção de polieletrólito
		12. Extração de escumas
		13. Extração de areias
		14. Elevação de óleos e gorduras
		15. Recirculação de água quente
		16. Extração de lamas digeridas
	2. Tratamento mecânico	1. Tamisação
		2. Desarenação
		3. Desengorduramento
		4. Coagulação/floculação
		5. Decantação primária
	3. Tratamento biológico	1. Arejamento do reator
		2. Decantação secundária
	4. Tratamento de lamas	1. Espessamento gravítico
		2. Espessamento mecânico
		3. Desidratação mecânica
		4. Estabilização química
	5. Outros tratamentos	1. Desodorização
		2. Recolha de escorrências
	6. Produção de biogás e energia	1. Digestão de lamas
		2. Cogeração
		3. Caldeira
	7. Edifícios	1. Iluminação
		2. Transformação e controlo

Apêndice D – Lista de grupos e matriz de consumos (excerto)

					A	B	C	D	E=C*D	F	H	I=E-H
Agregado					Potência Nominal	Potência medida	Potência média (com perdas dos agregados)	Horas de funcionamento	Consumo energético	Verificação de plausibilidade	Valor ideal	Diferença
Descrição	Unidade	Adl	Quadro elétrico	Cod. Eq.	kW	kW	kW	h	kWh	kWh	kWh	kWh
Estação elevatória inicial								SOMA:	0			
Parafuso de arquimedes 1	1.1	2009	QE 03 PA	P1111	30				0			
Parafuso de arquimedes 2	1.1	2009	QE 03 PA	P1112	30				0			
Parafuso de arquimedes 3	1.1	2009	QE 03 PA	P1113	30				0			
Tratamento biológico								SOMA:	0			
Arejador 1	3.1	2009	QE 05	A3111	45				0			
Arejador 2	3.1	2009	QE 05	A3112	45				0			
Arejador 3	3.1	2009	QE 05	A3113	45				0			
Arejador 4	3.1	2009	QE 05	A3121	45				0			
Arejador 5	3.1	2009	QE 05	A3122	45				0			
Arejador 6	3.1	2009	QE 05	A3123	45				0			
Arejador 7	3.1	2009	QE 05	A3131	45				0			
Arejador 8	3.1	2009	QE 05	A3132	45				0			
Arejador 9	3.1	2009	QE 05	A3133	45				0			
Bomba de extração de lamas biológicas 1	1.5	2009	QE 05	P3211	2,4				0			
Bomba de extração de lamas biológicas 2	1.5	2009	QE 05	P3212	2,4				0			
Bomba de extração de lamas biológicas 3	1.5	2009	QE 05	P3213	2,4				0			
Elevação final da AR								SOMA:	0			
Bomba elevatória final 1	1.2	2009	QE 07	P5211	21,3				0			
Bomba elevatória final 2	1.2	2009	QE 07	P5212	21,3				0			
Bomba elevatória final 3	1.2	2009	QE 07	P5213	21,3				0			
Bomba elevatória final 4	1.2	2009	QE 07	P5214	21,3				0			

